

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie



Vady svarových spojů austenitických ocelí

Defects in Welds of Austenitic Steels

Student:

Bc. Michal Misiarz

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Misiarz**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Vady svarových spojů austenitických ocelí**
Defects in Welds of Austenitic Steels

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Proved'te studii svařitelnosti austenitických ocelí.
- 2) Navrhněte možné způsoby svařování těchto ocelí.
- 3) Popište možné vady svarových spojů provedených těmito technologiemi.
- 4) Na vybraných svarových spojkách proved'te metalografické hodnocení identifikovaných vad.
- 5) Hodnocení vad potvrďte pomocí elektronové mikroskopie.
- 6) Proved'te diskuzi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. *Svařování I: Učební texty*. 1. vydání. VŠB-TU Ostrava. 2005. 133 s. ISBN 80-248-0870-6
Kolektí autorů *Materiály a jejich chování při svařování: Učební texty*. 1. vydání. ČSÚ s.r.o. Ostrava. 2016. 404 s.
HRIVŇÁK, I. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. 1. vydání. VSAV Bratislava. 1989. 344 s. ISBN 80-224-0016-5
ČSN EN ISO 15614-1 *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupů svařování - Část. 1: Obloukové a plamenové svařování ocelé a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. Praha: Český normalizační institut, 2005

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017

Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřisežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 28.4.2017


.....
podpis studenta

Prohlášení o využití výsledků diplomové práce

Prohlašuji, že

- Jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita báňská (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmů z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, který je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 28.4.2017.


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Michal Misiarz

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Farská 2, Bystřice, 73995

Poděkování

Za cenné rady a připomínky, které vedly k vypracování této diplomové práce bych tímto rád poděkoval vedoucímu práce, panu doc. Ing. Drahomíru Schwarzovi, CSc. Dále bych chtěl poděkovat panu prof. Ing. Vlastimilovi Vodárkovi, CSc. a paní Ing. Anastasii Volodarskaje za spolupráci při měření elektronovou mikroskopií. V neposlední řadě bych chtěl velice rád poděkovat své nejbližší rodině za podporu při studiu samotném.

Anotace diplomové práce

Misiarz, Michal. *Vady svarových spojů austenitických ocelí: Diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2017, 78s. Vedoucí práce: doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.

Hlavním cílem diplomové práce je klasifikovat vady svarových spojů z vysokolegované austenitické oceli X6CrNiTi 18-10, respektive určit zda vady vznikly během procesu svařování, nebo během samotného provozu zařízení. U vad, které vznikly v procesu svařování, je také uvedena predikce příčin jejich vzniku. Teoretická část diplomové práce je zaměřena na teorii svařitelnosti austenitických ocelí a také jsou v ní uvedeny typy vad, které mohou vzniknout při svařování této oceli, metodou 141 (TIG). V praktické části jsou vyhodnoceny vady ze čtyř vzorků a to zkoušením tomografickým, metalografickým a také zkoušením pomocí elektronového řádkovacího mikroskopu.

Annotation of master's thesis

Misiarz, Michal. *Defects in Welds of Austenitic Steels: Master's thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2017, 78p. Thesis head: doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.

The main goal of this thesis is to classify welding joint defects in high-alloy austenitic steel X6CrNiTi 18-10 and to determine whether these defects arose during the welding process or during the operation of the device. In the case of the defects which appeared during the welding process, a prediction of their occurrence is also included. The theoretical part of the thesis focuses on the theory of austenitic steel weldability and on the types of defects which may occur when the 141 (TIG) method is used to weld this type of steel. The practical part includes an evaluation of defects on four samples, which was done by tomography, metalography and by an electron scanning microscope.

Obsah

Seznam použitých značení a zkratk	9
1 Úvod	10
2 Svařitelnost austenitických ocelí	11
2.1 Vysokolegované oceli	11
2.2 Svařitelnost austenitických Cr-Ni, Cr-Ni-Mo ocelí	12
2.2.1 Vznik teplotních trhlin	12
2.2.2 Vznik mezikrystalové koroze	13
2.2.3 Vznik σ -fáze	15
2.2.4 Podmínky svařování austenitických ocelí	15
3 Technologie svařování austenitických ocelí	16
3.1 Technologie svařování 141	16
3.1.1 Princip technologie	16
3.1.2 Svařovací parametry	18
3.1.3 Ochranné plyny	20
4 Vady vzniklé během svařování metodou 141 (TIG)	21
4.1 Základní dělení vad ve svarových spojích	21
4.2 Klasifikace vad ve svarových spojích	22
5 Elektronová mikroskopie	24
5.1 Řádkovací elektronová mikroskopie	25
5.2 Spektrální analýza	27
5.2.1 RTG spektrální mikroanalýza.....	27
6 Vyhodnocení jednotlivých vzorků	29
6.1 Vzorek č.1	29
6.1.1 Charakteristika vad:.....	29
6.1.2 Shrnutí	36
6.2 Vzorek č.2	37
6.2.1 Charakteristika vad:.....	37
6.2.2 Shrnutí	43
6.3 Vzorek č.3	44
6.3.1 Charakteristika vad:.....	44
6.3.2 Shrnutí	50
6.4 Vzorek č.4	51

6.4.1 Charakteristika vad:.....	51
6.4.2 Shrnutí	57
7 Závěr	58
Použitá literatura	59
Seznam obrázků, grafů a tabulek.....	61
8 Přílohy	64
Seznam příloh.....	64
8.1 Příloha A – Rtg spektrální mikroanalýza vybraných oblastí vzorku č. 1.....	65
8.2 Příloha B – Rtg spektrální mikroanalýza vybraných oblastí vzorku č. 2.....	70
8.3 Příloha C – Rtg spektrální mikroanalýza vybraných oblastí vzorku č. 3.....	73
8.4 Příloha D – Rtg spektrální mikroanalýza vybraných oblastí vzorku č. 4.....	76

Seznam použitých značení a zkratek

Zkratky

BSE	zpětně odražené elektrony
CT	tomografické měření (computed tomography)
KH	kořenová housenka
MIG (131)	obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu
MMA (111)	ruční obloukové svařování tavící se elektrodou
RTG	rentgenové záření
SE	sekundární elektrony
SEM/REM	řádkovací (rastrovací) elektronová mikroskopie
SK	svarový kov
TEM	transmisní elektronová mikroskopie
TIG (141)	obloukové svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu
TOO	teplotně ovlivněná oblast
ZM	základní materiál
δ -Ferit	intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe δ
σ -Fáze	křehká intermetalická sloučenina

Značení veličin

I_s	svařovací proud [A]	T_p	teplota přehřevu [°C]
Q	tepelný příkon [kJ·cm ⁻¹]	U	napětí [V]
T_i	teplota interpass [°C]	v_s	rychlost svařování [cm·min ⁻¹]

Chemické značení

Al	hliník	Fe ₂₃ C ₆	karbid železa	P	fosfor
Ar	argon	He	helium	S	síra
C	uhlík	Mn	mangan	Si	křemík
CO ₂	oxid uhličitý	Mo	molybden	TaC	karbid tantalu
Cr	chrom	N	dusík	Ti	titan
Cr ₂₃ C ₆	karbid chromu	Nb	niob	TiC	karbid Titanu
Cu	měď	NbC	karbid niobu	V	vanad
Fe	železo	Ni	nikl	W	wolfram

1 Úvod

Cílem diplomové práce je klasifikovat vady ve svarových spojích, respektive určit příčinu jejich vzniku. Je nutné posoudit, zda vady vznikly během provozu zařízení, nebo během samotného svařování metodou 141 (obloukové svařování netavicí se elektrodou v inertním ochranném plynu). K co přesnější klasifikaci a zjištění příčin vzniku vad byly použity metalografické zkoušky, ale hlavně zkoušky mikroskopického zkoumání na elektronovém řádkovacím mikroskopu.

Zkoumanými vzorky jsou výřezy svarových spojů potrubí, jehož materiálem je vysokolegovaná austenitická chrom-niklová ocel s označením X6CrNiTi 18-10 (dle ČSN EN 10027-1).

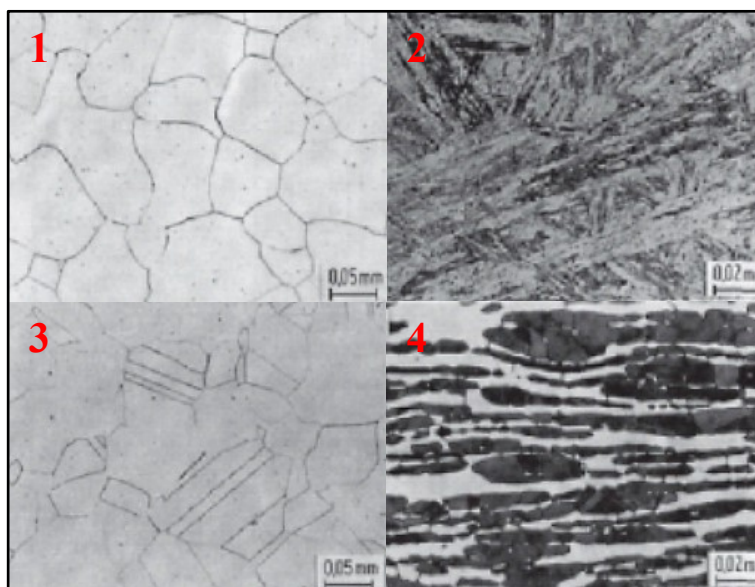
Vady byly nejprve identifikovány pomocí prozařovací metody (rentgenové záření). Následně byla přítomnost jednotlivých vad potvrzena tomografickým měřením, které také umožnilo zjištění jejich polohy. Díky zjištění přesné polohy zmíněných vad došlo v těchto místech k vytvoření metalografického výbrusu, po kterém následovaly zkoušky makrostruktury a mikrostruktury. Samotné a směrodatné vyšetření jednotlivých vad proběhlo na výše zmíněném řádkovacím elektronovém mikroskopu QUANTA FEG 450 na fakultě FMMI Vysoké školy Báňské – Technické univerzity Ostrava. Na tomto mikroskopu proběhla analýza topografie jednotlivých vad a také byla provedena analýza chemického složení jednotlivých fází, které se v místě vad nacházely (energieově disperzní rtg mikroanalýzou). Nakonec byla na vybraných vzorcích provedena analýza plošného rozložení jednotlivých chemických prvků v místě měřené vady, a to pomocí vlnově disperzní rtg mikroanalýzy. Tímto měřením byly získány další data, které byly využity pro zjištění příčin vzniku jednotlivých vad ve svarových spojích.

2 Svařitelnost austenitických ocelí

Svařitelnost materiálu je nutno posuzovat jako komplexní vlastnost, která je ovlivňována řadou aspektů. Je chybou říci, že materiál o určitém chemickém složení je zaručeně svařitelný, či nikoliv. Svařitelnost ovlivňují jak vlastnosti základního materiálu, metalurgické a konstrukční aspekty, tak také použitá metoda svařování, respektive její podmínky. Při posuzování svařitelnosti určitého materiálu je nutné brát v potaz technické požadavky, které jsou kladeny na daný svarový spoj, a dále také i vnější zatížení, pracovní prostředí, nebo požadovanou životnost daného svarového spoje.

2.1 Vysokolegované oceli [1, 2]

Vysokolegované oceli, mezi které řadíme i oceli austenitické se vyznačují tím, že obsahují více než 10 hm. % legujících prvků. Tyto oceli mají široké uplatnění v oborech, kde je požadavkem zvýšená odolnost proti korozi, žáruvzdornost, žárupevnost, či zvýšená odolnost proti opotřebení, nebo dosažení speciálních elektrických, popřípadě magnetických vlastností. Korozivzdorné vysokolegované oceli odolávají chemické i elektrochemické korozi a musí tedy být schopné pasivace, při níž je nutné, aby obsah chromu v materiálu přesahoval cca 12 hm. %. Na (obr. 2.1-1) je zobrazena mikrostruktura vybraných korozivzdorných ocelí.



Obr. 2.1-1 Mikrostruktura vybraných korozivzdorných ocelí [2]

1. Feritické chromové oceli.
2. Martenzitické chromové oceli.
3. Austenitické Cr-Ni, nebo Cr-Ni-Mo oceli.
4. Austeniticko-feritické Cr-Ni, nebo Cr-Ni-Mo oceli

Výše zmíněné rozdělení vysokolegovaných ocelí závisí především na obsahu hlavních legujících prvků, které ovlivňují mikrostrukturu samotné oceli. Hlavní legující prvky se podle toho zda zvětšují, či zmenšují oblast železa γ v diagramu Fe-Fe₃C, dělí na:

a) Austenitotvorné prvky (rozšiřují oblast železa γ) – C, Ni, Cu, Mn, N.

b) Feritotvorné prvky (zmenšují oblast železa γ) – Cr, Mo, Si, Al, W, Ti, Nb. V.

2.2 Svařitelnost austenitických Cr-Ni, Cr-Ni-Mo ocelí [1, 2]

Austenitické oceli jsou charakteristické tím, že disponují asi o 50 % větší tepelnou roztažností a asi o 30 % nižší tepelnou vodivostí, než oceli feritické. Tyto vlastnosti se projevují zvýšenými deformacemi, nebo napětím, než je tomu u ocelí feritických. Austenitické oceli obvykle obsahují minimálně 16,5 hm. % Cr, společně s dostatečně velkým množstvím Ni, Mn, C a N. Tyto prvky zabezpečují vznik austenitické struktury. Pro zvýšení protikorozních vlastností se austenitické oceli mohou dále dolegovávat prvky jako jsou Ti, Mo, Cu, Nb, či Si.

Svařitelnosti austenitických Cr-Ni, nebo Cr-Ni-Mo ocelí, negativně ovlivňují tři základní faktory:

- 1) Riziko vzniku teplých trhlin.
- 2) Precipitace karbidu chromu → vznik mezikrystalové koroze.
- 3) Vznik σ -fáze → zkřehnutí.

2.2.1 Vznik teplých trhlin [1]

Do skupiny teplých trhlin jsou zařazeny trhliny krystalizační, polygonizační a likvační. Krystalizační teplé trhliny vznikají ve svarovém kovu a to v oblasti teplot mezi křivkou solidu a likvidu. Polygonizační a likvační teplé trhliny mohou vznikat jak ve svarovém kovu, tak ale i v teplotně ovlivněné oblasti. Největší význam na vznik teplých trhlin má zvýšený obsah prvků jako jsou S, P, Si, Ti, nebo Nb. Tyto uvedené prvky mohou snižovat plasticitu tuhnoucí oceli v mezidendritických prostorech, nebo mohou také společně s železem a niklem vytvářet nízkotavitelná eutektika, které jsou příčinou snížení hodnot pevnosti hranic zrn. Obsah síry lze eliminovat přidáním, respektive dolegováním dostatečného množství manganu, kdy tento prvek vytvoří se sírou MnS, který poté přechází do strusky. Obsah fosforu je možné eliminovat technologicky, využitím skutečnosti, že je fosfor asi 10x lépe rozpustný v δ -feritu, než v austenitu. Obsahy křemíku, titanu a niobu se pak limitují pod hranici obsahu nutného pro stabilizaci dané oceli.

Dle vztahu (2.2.1) je možno určit náchylnost dané oceli ke vzniku teplých trhlin. Je-li ($L > 0$ a $\Delta H < 100$) \rightarrow ocel je náchylná na vznik teplých trhlin.

$$L = 299 C + 8 Ni + 142 Nb - 5,5 \delta^2 - 105$$

$$\Delta H = -700 C + 17 Cr - 37 Ni - 117 Nb + 29 Mo + 188 \quad (2.2.1)$$

(Prvky jsou udávány v hmotnostních procentech. Obsah δ -feritu je udáván v procentech.)

Opatření proti vzniku teplých trhlin:

- Použití přídavných materiálu s co možná nejvyšší čistotou a s vysokým obsahem manganu.
- Pokud je to možné, snížit tuhost upnutí svarového spoje.
- Eliminovat množství tepla vneseného do svaru \rightarrow snížit tepelný příkon, nebo zabránit vzniku širokých svarových housenek.
- Kontrolovat interpass teplotu (max. 150 °C) a šířku svarové lázně k její výšce (1:1 – 1:1,5).
- Omezit rychlost svařování.

2.2.2 Vznik mezikrystalové koroze [1]

U austenitických korozivzdorných ocelí může mezikrystalová koroze nastat v rozmezí teplot od 425 do 815 °C (tzv. pásmo zcitlivění). V současné době existují tři základní teorie o vzniku mezikrystalové koroze:

- 1) **Teorie ochuzení** – Tato teorie vysvětluje vznik mezikrystalové koroze na základě úbytku obsahu chromu a to v okolí vylučujících se karbidů a nitridů chromu. Limitní hranice minimálního obsahu chromu, který zaručuje odolnost proti mezikrystalové korozi je stanovena na 12 hm. %.
- 2) **Teorie pnutí** – Tato hypotéza je založena na faktu, že mezikrystalová koroze vzniká na základě energetických rozdílů, které jsou v určitých místech materiálu přítomné díky pnutí, jenž vzniká vyloučením jedné fáze a růstem fáze druhé.
- 3) **Teorie tzv. článků** – Teorie článků popisuje vznik mezikrystalové koroze na základě procesu elektrolytického rozrušování kovů, kdy dochází ke korozi méně ušlechtilého kovu, který je vodivě spojen s kovem více ušlechtilým. Katodou obvykle bývá karbid (nitrid) a anodou, která se rozrušuje, pak bývá samotný kov.

Opatření proti vzniku mezikrystalové koroze:

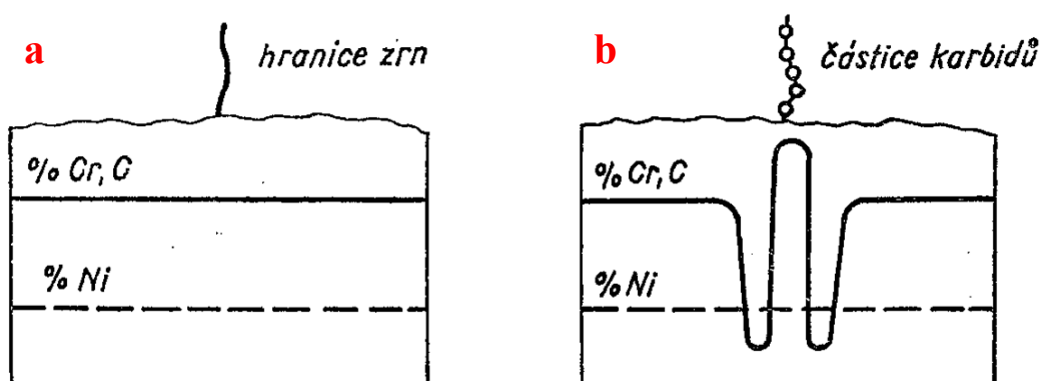
Všechny teorie vzniku mezikrystalové koroze uvažují jako základní příčinu precipitaci karbidů a nitridů chromu. Vznik karbidů chromu je ovlivněn chemickým složením, s největším ohledem na množství uhlíku. Jednou z možností zabránění mezikrystalové koroze je limitovat množství uhlíku pod hodnotu 0,03 hm. %. Někdy je technologicky nemožné, nebo nevýhodné snížit množství samotného uhlíku. Další možností zabránění vzniku mezikrystalové koroze je tedy dolegování materiálů prvky s vyšší afinitou k uhlíku, než má samotný chrom (Ti, Nb, Ta). Místo vytvoření karbidů chromu $(\text{Cr, Fe})_{23}\text{C}_6$ a $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$ se vytvoří karbidy titanu TiC, niobu NbC a tantalu TaC. Tímto opatřením nedojde k ochuzení hranic zrn o chrom. Podle obsahu samotného uhlíku je nutné dodržet následující poměr (2.2.2), aby došlo k stabilizaci korozivzdorných ocelí:

$$\frac{\text{Nb}}{\text{C}} \geq 8 \quad \frac{\text{Ti}}{\text{C}} \geq 4 \quad \frac{\text{Nb}+\text{Ta}}{\text{C}} \geq 8 \quad \frac{\text{Ta}}{\text{C}} \geq 16 \quad (2.2.2)$$

(Prvky jsou udávány v hmotnostních procentech).

Další možností zabránění vzniku mezikrystalové koroze oceli je její tepelné zpracování při teplotě ohřevu nad 950 °C (rozpouštěcí žhání). Při této teplotě dochází k rozpouštění vyprecipitovaného karbidu chromu. Rychlým ochlazením se zabrání zpětné precipitaci karbidu chromu a ocel se tak stává necitlivou k mezikrystalové korozi.

Na obr. (2.2.2-1) je schematicky znázorněno mezikrystalové vylučování karbidů austenitických ocelí.



Obr. 2.2.2-1 Mezikrystalové vylučování karbidů [2]

- a) Rovnoměrné rozložení obsahu Cr, C a Ni.
- b) Vylučování karbidů na hranicích zrn.

2.2.3 Vznik σ -fáze [1]

Fázi σ lze charakterizovat jako tvrdou, křehkou, intermetalickou sloučeninu, která nejčastěji vzniká v rozmezí teplot od 500 – 820 °C a je příčinou zkřehnutí austenitických ocelí. Tato nepříznivě působící fáze se v největších objemech projevuje u ocelích s obsahem chromu vyšším, než 10 hm. %.

Nejčastější příčinou vzniku σ fáze je:

- Přítomnost feritotvorných prvků (Si, Al, Ti, Mo, Nb), které zapříčiňují vznik fáze α s vyšším obsahem chromu a usnadňují tedy její přeměnu na fázi σ .
- Přítomnost karbidotvorných prvků (Ti, Zr, Nb, Ta), které mají vysokou afinitu k uhlíku a zabraňují vazbě chromu na karbidy.
- Rychlé ochlazení → místní přesycení chromem.
- Místní obohacení fáze α chromem, charakteristické při heterogenitě taveb.
- Hrubozrnná struktura → σ -fáze snadněji migruje k hranicím zrn, kde se rozloží a vzniká mezikrystalová křehkost.
- Vysoká intenzita tváření za studena.
- Únava materiálu za tepla.

2.2.4 Podmínky svařování austenitických ocelí [1, 2]

Pro svařování austenitických ocelí lze zvolit téměř všechny technologie svařování s dobrou ochranou svarového kovu. Přídavné materiály volíme podle podobnosti chemického složení se základním materiálem.

Austenitické materiály nepředehříváme, poněvadž nejsou náchylné na vznik studených trhlin. Jak již bylo v této kapitole zmíněno, austenitické materiály jsou náchylné na vznik teplých trhlin, proto se limituje tepelný příkon maximální hodnotou 15 kJ·cm⁻¹ a také interpass teplota (max. 150 °C). Ve většině případů se austenitické oceli, kromě rozpouštěcího žíhání, tepelně nezpracovávají, vyjma tuhých a geometricky složitých svařenců. V těchto případech se aplikuje žíhání na snížení vnitřního pnutí.

Ochranné atmosféry se používají na bázi argonu a jeho směsi (Ar, Ar+He, Ar+H₂). Není vhodné použití ochranných plynů s obsahem CO₂ přesahující hodnotu 2,5 %.

3 Technologie svařování austenitických ocelí [2, 3]

Korozivzdorné, austenitické oceli jsou obecně technologicky svařitelné, kromě svařování kovářského, všemi známými technologiemi. I přes tento fakt se pro jejich svařování nejčastěji využívá obloukových metod.

Nejčastěji se používají metody:

- 111 (ruční obloukové svařování tavící se elektrodou)
- 131 (obloukové svařování tavící se elektrodou v inertní ochranné atmosféře)
- 141 (obloukové svařování netavící se elektrodou v inertní ochranné atmosféře).

Vzorky svarových spojů, které byly zkoumány v rámci diplomové práce, byly svařované metodou 141 (TIG), proto bude v dalších částech této kapitoly popsána právě tato technologie svařování.

3.1 Technologie svařování 141 (TIG)

Obloukové svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu je jednou z nejprogresivnějších technologií vůbec. Tato metoda má dominantní postavení při svařování vysokolegovaných ocelí i neželezných kovů. Metodu 141 je možno využít jak při výrobě svařovaných dílů, tak při opravách konstrukcí a zařízení. Během těchto operací lze touto metodou svařovat ručně, nebo i pomocí svařovacích automatů.

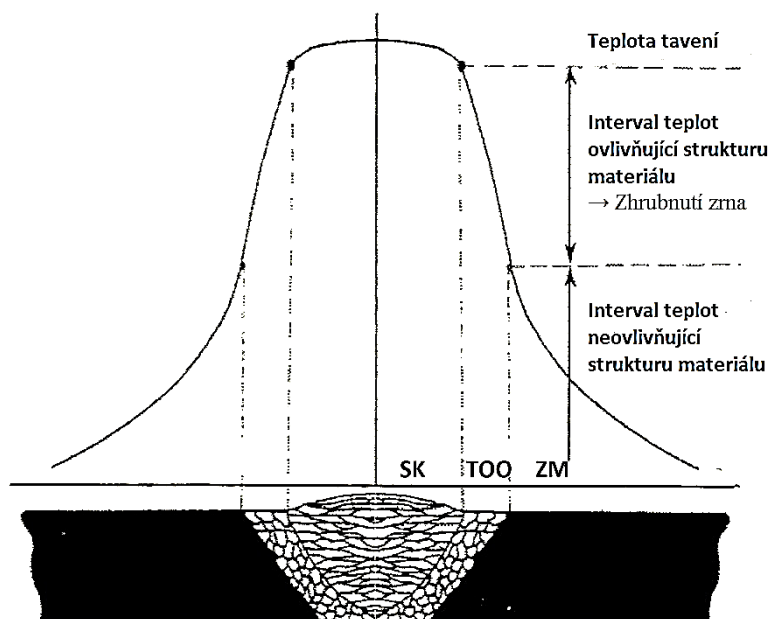
3.1.1 Princip technologie 141

Metodu 141 (TIG) řadíme mezi technologie tavného svařování. Termická aktivace, která je nutná pro zvýšení amplitudy rozkmitu iontů v krystalografické mřížce, respektive k uvolnění těchto iontů z jejich rovnovážných poloh, se získává hořením elektrického oblouku mezi netavící se, wolframovou elektrodou a základním materiálem v prostředí inertního plynu. Působením tepla na základní materiál, popřípadě i na materiál přídatný, dochází k jejich natavení a vzniku svarové lázně. Velmi důležitým aspektem pro samotnou kvalitu výsledného svarového spoje je ochlazování svaru po jeho bezprostředním sváření. Rychlost ochlazování přímo souvisí s výslednou strukturou svarového spoje a tedy i s jeho užitnými vlastnostmi. Po ztuhnutí vzniká svarový spoj, který se u nepolymorfních ocelí, tzn. u ocelí, u kterých neprobíhá fázová přeměna v tuhém stavu, rozděluje do 3 částí (obr. 3.1.1-1).:

1. **Základní materiál (ZM)** – Tato oblast svarového spoje si zachovává svou původní strukturu, protože není během svařování teplotně ovlivněna, respektive teploty, které

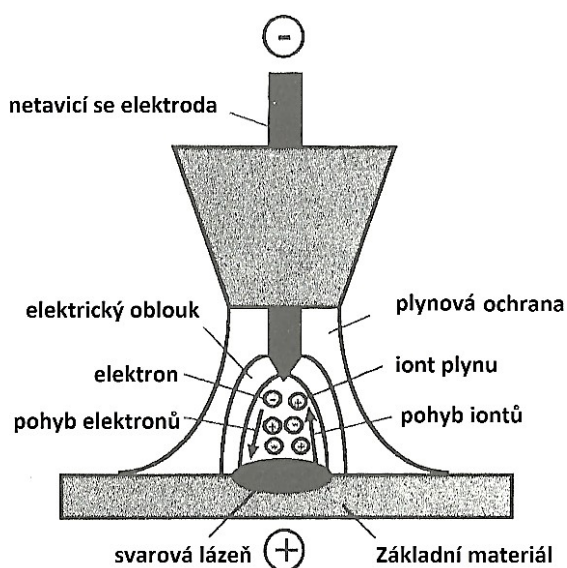
v této oblasti svarového spoje působí, nejsou natolik vysoké, aby byly příčinou změny struktury a tedy i vlastností svařovaného materiálu.

2. **Tepelně ovlivněná oblast (TOO)** – Má hrubozrnnou strukturu přehřátého základního materiálu.
3. **Svarový kov (SK)** – Teploty v této části svarového spoje dosahují během svařování hodnot větších, než jsou hodnoty charakteristické křivce tavení (likvidus). Dochází zde tedy ke vzniku taveniny.



Obr. 3.1.1-1 Strukturní oblasti při svařování nopolymorfních ocelí [3]

Na (obr. 3.1.1-2) je schematicky znázorněn princip procesu svařování metodou 141 v modifikaci svařování bez přídavného materiálu.



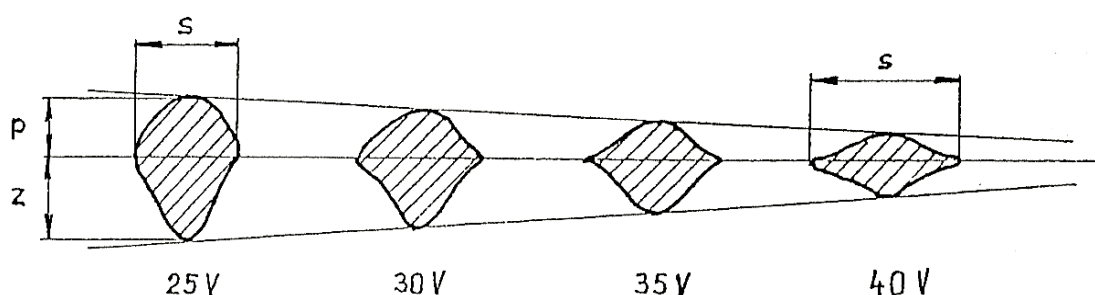
Obr. 3.1.1-2 Schéma metody svařování 141 (TIG) [3]

3.1.2 Svařovací parametry [3, 4]

Správné určení a nastavení svařovacích parametrů má zásadní vliv na výsledné vlastnosti svarového spoje u všech technologií svařování. Z tohoto důvodu je důležité tento aspekt jasně definovat. Při technologii 141 vstupuje do svařovacího procesu řada parametrů, ovšem největší vliv na kvalitativní vlastnosti svarového spoje mají parametry jako svařovací proud, svařovací napětí, rychlost svařování a velikost průtoku ochranného plynu. Mezi další, méně významné parametry svařování patří: Průměr elektrody, vrcholový úhel elektrody, vyložení elektrody, průměr přídavného materiálu, sklon přídavného materiálu, průměr hubice hořáku a úhel hubice hořáku.

Napětí

Napětí na oblouku je charakterizováno jako potenciální rozdíl mezi koncem elektrody a samotným povrchem svarové lázně. Je tedy zřejmé, že jeho hodnota se bude měnit se vzdáleností elektrody od místa svařování. Napětí během svařovacího procesu majoritně ovlivňuje šířku housenky, méně podstatně pak velikost průvaru. S rostoucí hodnotou napětí tedy významně roste i šířka svarové housenky (obr. 3.1.2-1).

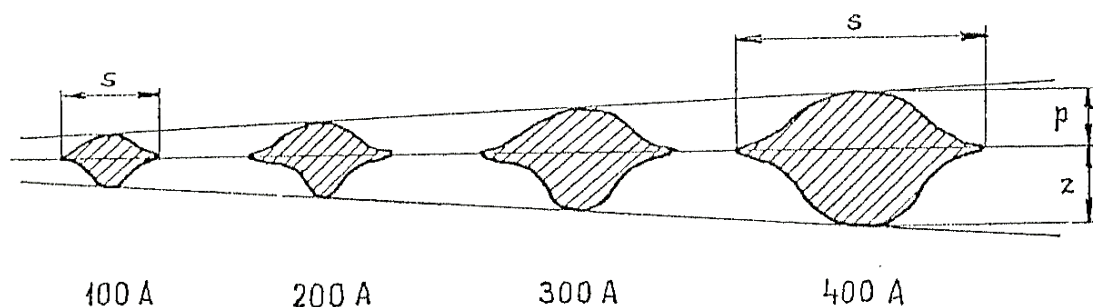


Obr. 3.1.2-1 Napětí a jeho vliv na šířku svarové housenky [4]

Při nadměrně vysokém napětí může docházet k oxidaci prvků, jejichž obsah se poté musí nahrazovat prvky z přídavných materiálů. Tento nepříznivý děj u metody 141 ovšem nastane jen při nedokonalé ochraně svarového spoje inertními plyny. S příliš vysokým napětím se také pojí zvýšený rozstřík kovů a špatná ovladatelnost svarového oblouku.

Svařovací proud

Svařovací proud především ovlivňuje geometrii svarové housenky. Ze zvyšující se hodnotou svařovacího proudu a při konstantní hodnotě napětí se zvětšuje i průvar svaru s relativně malým nárůstem převýšení a šíře svarové housenky (obr. 3.1.2-2). Svařovací proud se u metody 141 volí především podle tloušťky a vodivosti základního materiálu, podle typu spoje, polohy svařování a rychlosti pohybu hořáku.



Obr. 3.1.2-2 Svařovací proud a jeho vliv na šířku svarové housenky [4]

Rychlost svařování

Hodnota tohoto parametru závisí především na tom, zda se jedná o svařování ruční, kdy je rychlost svařování menší, nebo zda se jedná o svařování pomocí automatu. Při svařování s přídavným materiálem, jsou rychlosti svařování přibližně o 20% menší, než při svařování bez použití přídavného materiálu. Další aspekt, ovlivňující tento parametr je poloha svařování. Pokud je zvolena jiná poloha, než poloha PA (vodorovná shora) snižuje se rychlost svařování až o 30%.

V (tab. 3.1.2-1) jsou vypsány doporučené svařovací parametry technologie 141 pro austenitické oceli.

Tab. 3.1.2-1 Doporučené svařovací parametry s ohledem na tloušťku základního materiálu [3]

Tloušťka plechu [mm]	Svařovací proud [A]	Průměr elektrody [mm]	Rychlost svařování [cm·min ⁻¹]	Průtok ochranného [l·min ⁻¹]
0,6	15-25	1,0	30-40	3
0,8	15-30	1,0	30-40	3-4
1,0	25-55	1,0	25-30	4
1,5	50-80	1,5	25-30	4-5
2,0	80-110	1,5 – 2,0	20-25	4-5
3,0	100-150	1,5 – 2,0	20-25	5
4,0	120-200	3,0	15-20	5-6
5,0	130-250	3,0	15-20	5-6

3.1.3 Ochranné plyny [3, 4]

Ochranné plyny při svařování metodou 141, respektive u všech metod svařování v ochranných atmosférách zásadním způsobem ovlivňují kvalitativní vlastnosti samotného svarového spoje. Nejdůležitější funkcí ochranných plynů je zamezení přístupu okolní atmosféry do místa svařování. Současně také chrání netavicí se elektrodu, a vytvářejí příznivé podmínky pro zapálení a stabilitu oblouku. Při svařování metodou 141, se stejně jako u metody 131 používají inertní ochranné plyny, které se na rozdíl od aktivních plynů nezúčastňují chemických reakcí se svarovou lázní.

Ochranné plyny, které se používají při svařování metodou 141, se dělí do dvou základních skupin:

- 1. Inertní plyny (Ar, He, Ar + He)** – Tvoří primární ochranu svaru.
- 2. Redukční plyny (Ar, Ar + H, N + H)** – Většinou se používají jako sekundární ochrana svarového spoje (ochrana svaru během jeho chladnutí, nebo ochrana kořene svaru).

Výřezy svarových spojů, které jsou zkoumány v této diplomové práci, byly svařovány v primární i sekundární ochranné atmosféře na bázi čistého argonu.

Argon a jeho vlastnosti

Jedná se o základní, s jinými prvky nereagující složku, která se využívá jak při svařování v inertní, tak aktivní ochranné atmosféře, kde je často ve směsi s oxidem uhličitým. Argon je jednoatomový plyn, který nemá žádnou barvu, chuť, ani zápach. Díky své malé tepelné vodivosti a relativně malému ionizačnímu potenciálu příznivě ovlivňuje vlastnosti hořícího oblouku, který se pak dobře zapaluje a má vysokou stabilitu. Při svařování metodou 141 se argon jako primární ochrana používá jen s vysokou čistotou. Argon o nižší čistotě lze použít jako sekundární ochranu. Argon se získává frakční destilací vzduchu, v kterém jeho množství činí cca 1%. Argon jako takový je těžší než samotný vzduch, proto dochází k jeho efektivnímu vytlačení z místa svařování

4 Vady vzniklé během svařování metodou 141 (TIG)

Svařování metodou 141, stejně jako ostatní metody svařování, nese sebou jisté riziko vzniku vad ve svarových spojích a to jak na jejich povrchu, tak i uvnitř materiálu. Vady ve svarových spojích představují riziko pro celkovou bezpečnost svařované konstrukce či součásti, protože nepříznivě ovlivňují mez únavy, ale také se mohou v určitých případech stát iniciátory lomu. Z tohoto důvodu je nutné, aby byly svarové spoje bez vad, popřípadě aby obsahovaly pouze ty vady, které nikterak neohroží bezpečnost svařované součásti, či konstrukce.

4.1 Základní dělení vad ve svarových spojích [5, 6]

Vady ve svarových spojích můžeme posuzovat podle různých stanovisek, ovšem nejčastěji tyto vady dělíme podle jejich tvaru a polohy.

Rozdělení vad podle tvaru:

- **Bodové** – Mikropóry, nebo např. malé sférické vměstky.
- **Plošné** – Trhliny, mikrotrhliny, studené spoje, popřípadě i neprůvary a nespojitosti návaru se základním materiálem.
- **Prostorové** – Plynové dutiny (bubliny, póry), vměstky (struskové, tavidlové, oxidické, kovové) a staženiny (mezidendritické, kráterové).

Rozdělení vad podle jejich polohy:

- **Povrchové** – Na povrchu se mohou vytvořit vady jako trhliny, mikrotrhliny, studené spoje, neprůvary a neprovařené kořeny.
- **Vnitřní** – Jsou to nejčastěji plynové dutiny, vměstky, staženiny, neprůvary v kořeni u oboustranného nebo koutového svaru, studené spoje mezi vrstvami housenek, nebo také studené spoje mezi základním materiálem a svarovým kovem.

Na vznik vad ve svarových spojích má vliv řada aspektů. Vady, respektive jejich vznik a jejich množství ovlivňuje jak materiálový aspekt, tak různé podmínky dané svařovací technologií. Velký význam v této problematice má i samotný lidský faktor svářeče.

Nejméně příznivé vady, tedy vady, které zásadním způsobem snižují bezpečnost svařované součásti či konstrukce, jsou trhliny. Ty jsou jednoznačně nepřijatelné ve všech oblastech a stupních hodnocení. Mechanismus vzniku trhlin v austenitických korozivzdorných ocelích a podmínky pro jejich eliminaci jsou uvedeny v kapitole 2 (svařitelnost austenitických ocelí).

4.2 Klasifikace vad ve svarových spojkách [5, 6]

Klasifikaci vad svarových spojek, které byly zhotoveny metodami tavného svařování, popisuje norma ČSN EN ISO 6520 – 1. Tato norma rozděluje vady do šesti základních skupin. V (tab. 4.1-1) jsou uvedeny nejzákladnější typy vad svarových spojek, které mohou vzniknout při svařování metodou 141 (TIG).

Tab. 4.1-1 Vady ve svarových spojkách dle normy ČSN EN ISO 6520 -1 [5,6]

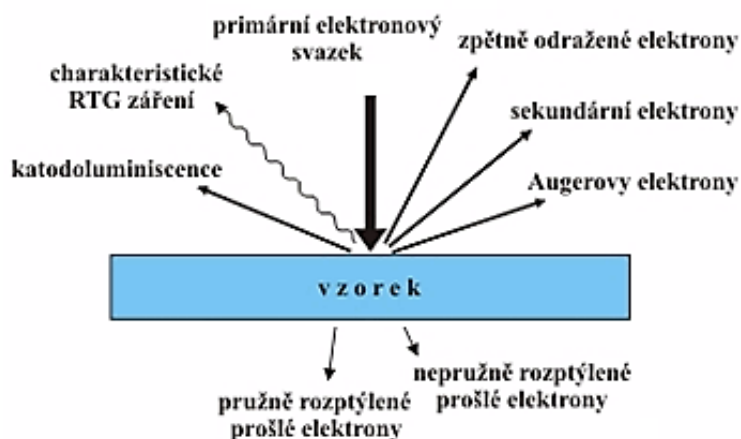
1 - Trhliny		
Referenční číslo	Název vady	Popis
100	Trhlina	Vada způsobená místním porušením v tuhém stavu, kdy může vzniknout vlivem ochlazení nebo pod napětím
1001	Mikrotrhlina	Trhlina, která je viditelná pouze pod mikroskopem
101	Podélná trhlina	Trhlina, která je rovnoběžná s osou svaru
102	Příčná trhlina	Trhlina, která je kolmá na osu svaru
103	Hvězdicová trhlina	Trhliny, které vycházejí z jednoho bodu
104	Kráterová trhlina	Trhlina, která vznikne na konci svarové housenky
105	Skupina nespojitých trhlín	Skupina trhlín, které nejsou vzájemně propojeny
106	Rozvětvené trhliny	Spojité trhliny, které vycházejí ze společné trhliny
2 - Dutiny		
Referenční číslo	Název vady	Popis
201	Plynová dutina	Dutina, která byla vytvořena uzavřeným plynem
2011	Pór	Plynová dutina kulovitěho tvaru
2012	Rovnoměrná pórovitost	Rovnoměrně rozmístěné póry ve svarovém kovu
2013	Shluk pórů	Nepravidelně rozmístěné pory
2014	Řádek pórů	Řada pórů, které jsou umístěny ve směru osy svaru
2015	Protáhlý pór	Protáhlá nekulovitá dutina
2016	Červovitý pór	Dutina ve tvaru trubičky
202	Staženina	Dutina, která vznikne smrštěním během tuhnutí
3 – Pevné vměstky		
Referenční číslo	Název vady	Popis
300	Pevný vměstek	Tuhá cizí částice ve svarovém kovu
303	Oxidický vměstek	Tuhá cizí částice ve formě kovového oxidu
304	Kovový vměstek	Tuhá cizí částice ve formě cizího kovu

4 – Studené spoje a neprůvary		
Referenční číslo	Název vady	Popis
401	Studený spoj	Nedostatečné spojení, respektive natavení mezi svarovým kovem a základním materiálem, nebo také mezi jednotlivými svarovými housenkami <ul style="list-style-type: none"> • Na svarové ploše (4011) • Mezi housenkami (4012) • V kořeni (4013) • Mikrostudený spoj (4014)
402	Neprůvar	Nedostatečný průvar oproti průvaru předepsaného
5 – Vady tvaru a rozměru		
Referenční číslo	Název vady	Popis
500	Vada tvaru	Nesprávná geometrie svaru, nebo nesprávný tvar svaru
501	Zápal (vrub)	Vrub mezi základním materiálem a svarovým kovem, nebo mezi jednotlivými housenkami
502, 503	Nadměrné převýšení	Nadměrné převýšení na lící straně tupého svaru (502) Nadměrné převýšení koutového svaru (503)
504	Nadměrný průvar	Příliš velké převýšení v kořenové části tupého svaru
505	Strmý přechod svaru	Příliš malý úhel mezi základním materiálem a tečnou rovinou k povrchu svaru
506	Přetečení	Příliš velké překrytí povrchu základního materiálu svarovým kovem <ul style="list-style-type: none"> • Přetečení krycí vrstvy (5061) • Přetečení kořenové vrstvy (5062)
507, 508	Přesazení	Lineární (507) <ul style="list-style-type: none"> • Mezi trubkami (5072) Úhlové (508)
509	Proláklina	Sesunutí svarového kovu vlivem působení zemské přitažlivosti
510	Díra	Propadnutí tavné lázně
511	Neúplné vyplnění svaru	Žlábek na povrchu svaru vzniklý pokládáním nedostatečného množství přídavného materiálu
513	Nepravidelná šířka	Příliš velká proměnlivost šířky svaru
514	Nepravidelný povrch	Příliš velká proměnlivost povrchu
515	Hubený kořen	Prohlubeň v kořeni způsobená smrštěním svarového kovu
6 – Různé vady		
Referenční číslo	Název vady	Popis
602	Rozstřík	Kapky svarového kovu ulpělé na základním materiálu
603	Vytržený povrch	Poškození povrchu při odstranění přípravků

5 Elektronová mikroskopie [7, 8, 9]

Jak již bylo zmíněno v úvodu, jednou z metod která byla použita pro klasifikaci vad ve svarových spojích a zjištění příčin jejich vzniku byla metoda elektronové mikroskopie. Pomocí této metody byly získány nejpresnější data zohledňující problematiku diplomové práce. Z tohoto důvodu je právě tato metoda níže vysvětlena.

Elektronová mikroskopie jako taková vychází z mikroskopie optické. Díky zfokusovaného svazku elektronů, je však touto technologií možno dosáhnout velice vysokých hodnot rozlišovacích vlastností. Zdroj záření je totiž přibližně o pět řádů menší, než je tomu u záření světelného a zároveň má i lepší ovladatelnost v elektrickém, či magnetickém poli. Při dopadu elektronů na povrch zkoumaného materiálu dochází k různým jevům jejich rozptylu (obr. 5-1). Část elektronů, pokud je materiál dostatečně tenký, může vzorkem projít. Tyto elektrony nazýváme jako prošlé elektrony. Při ozařování vzorků větších tlouštěk dochází k velice intenzivním srážkám elektronů s atomy materiálu vzorků. Elektrony pak ztratí část své kinetické energie a celý vzorek neprozáří, respektive zůstávají v něm uvězněné. Tento jev je charakteristický pro elektrony absorbované.



Obr. 5-1 Produkty pružného a nepružného rozptylu elektronů [6]

Děje vyvolané rozptylem elektronů v materiálu vzorku se dělí do dvou hlavních skupin:

a) pružný rozptyl – Při tomto ději se téměř nemění energie elektronů nýbrž jen jejich směr. Elektrony tedy opouštějí vzorek bez větších energetických ztrát v porovnání s elektrony primárními. Tyto elektrony jsou označovány jako zpětně odražené elektrony.

b) nepružný rozptyl – Na rozdíl od pružného rozptylu se při tomto ději mění jak směr pohybu elektronů, tak také jejich energie. Primární elektrony předávají svou energii volným elektronům (nastává tzv. plazmová excitace), nebo elektronům, které jsou vázané v obalu atomu (tzv. obalová excitace). Při obalové excitaci se primární elektrony srážejí s elektrony atomů

materiálů. Ty jsou poté vytrženy ze svých drah, do kterých ihned putuje atom z vyšší energetické hladiny. Tento děj je s 30% pravděpodobností doprovázen vyzářením fotonu rentgenového záření, či Augerova elektronu. Část primárních, absorbovaných elektronů mohou uvolňovat elektrony z vnějších hladin atomů – vznikají tak sekundární elektrony.

Elektronová mikroskopie se podle principu měření rozděluje na dvě základní oblasti. Pro měření velice tenkých vzorků, kde tloušťky preparátu nepřesahují 0,2 μm , se používá tzv. transmisní elektronová mikroskopie (TEM). Další možností vyhodnocení vzorků, a to především vzorků větších (neprozařitelných) tloušťek je řádkovací (rastrovací) elektronová mikroskopie (SEM, REM). Tato metoda byla využita pro experimentální část diplomové práce, proto bude následně podrobněji popsána.

5.1 Řádkovací elektronová mikroskopie

Řádkovací, respektive rastrovací elektronová mikroskopie (SEM, REM) se využívá pro měření s velice vysokými hodnotami rozlišení, velkého zvětšení a ostrosti. Vzorek, který může mít i relativně velké rozměry není nutno nijak zvlášť upravovat, pokud se jedná o vzorek elektricky vodivý. Nevodivé vzorky, a to i včetně nevodivých fází v kovech je třeba přivést do vodivého stavu např. napařením kovu, nebo uhlíku.

Principem řádkovací elektronové mikroskopie je vytváření primárních svazků elektronů, které jsou emitované katodou a urychlované kladným napětím na anodě, a jejich fokusování na povrchu vzorku. Osvětlovací soustava řádkovacího elektronového mikroskopu je téměř totožná s osvětlovací soustavou mikroskopu transmisního. Účinku rastrování (řádkování) a tedy umožnění svazku registrovat údaje bod po bodu, se dosahuje pomocí vychylovacích cívek.

Na (obr. 5.1-1) je znázorněn řádkovací elektronový mikroskop QUANTA FEG 450, který byl používán pro samotné měření a vyhodnocování vzorků svarových spojů, které jsou zkoumány v rámci této diplomové práce



Obr. 5.1-1 Řádkovací elektronový mikroskop QUANTA FEG 450

Podle typu vzorku a v závislosti na použitých detektorů fyzikálních signálů je možné řádkovací elektronovou mikroskopií získat informace o:

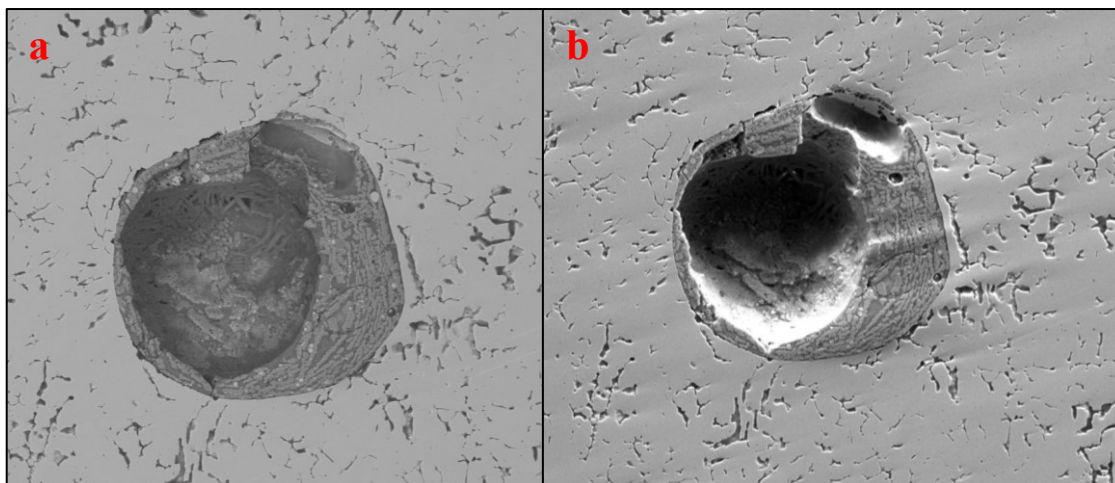
- Topografii zkoumaného elementu.
- Lokálním chemickém složení zkoumaného elementu.
- Materiálové krystalografii.
- Dalších materiálových vlastnostech (luminiscence, magnetismus, elektrická vodivost).

Pro vytvoření obrazu části zkoumaného vzorku se v rastrovací elektronové mikroskopii využívají:

a) Zpětně odrážené elektrony (BSE) – Mají větší energii, než sekundární elektrony a mohou být tedy emitovány z mnohem větší hloubky pod povrchem zkoumaného vzorku. Na druhou stranu jsou ale emitovány z většího objemu vzorku a díky tomu disponují menší hodnotu rozlišení.

b) Sekundární elektrony (SE) – Tyto elektrony mají energii do cca 50eV a jsou emitovány z hloubky do cca 50nm pod povrchem ozařovaného materiálu. Moderní elektronové řádkovací mikroskopy s autoemisní tryskou disponují bodovým rozlišením až na úrovni cca 1nm.

Na (obr. 5.1-2) je vlevo znázorněn defekt ve svarovém kovu pomocí zpětně odražených elektronů (a) a vpravo pak pomocí sekundárních elektronů (b).



Obr. 5.1-2 Porovnání obrazu – zpětně odrážené elektrony (a), sekundární elektrony (b)

5.2 Spektrální analýza

Elektronová mikroskopie, respektive produkty nepružného rozptylu mohou být využity pro určení lokálního chemického složení vzorků. Mezi nejvyužívanější signály spektrální analýzy patří:

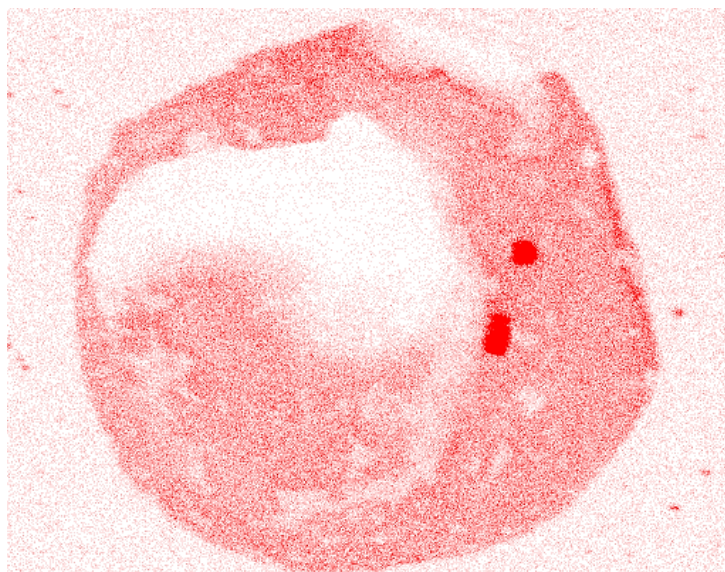
- Charakteristické rtg záření.
- Elektrony (nepružně rozptýlené) prošlé vzorkem.
- Augerovy elektrony.

5.2.1 RTG spektrální mikroanalýza

V rámci diplomové práce byla využita metoda RTG spektrální mikroanalýzy, která umožňuje stanovit lokální chemické složení materiálu na základě detekce charakteristického rtg záření v místě dopadu svazku primárních elektronů. Podle způsobu rozpadu rentgenového záření vystupujícího ze vzorku se tato analýza dále dělí na:

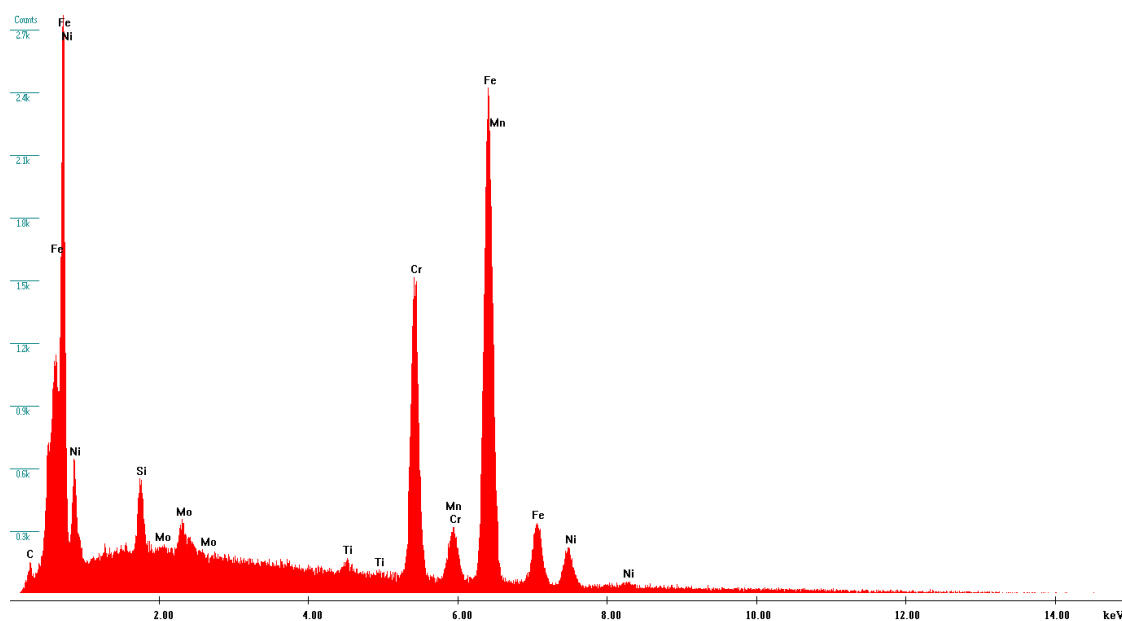
- **Vlnově disperzní analýzu** (Využívá se výlučně v SEM)
- **Energiově disperzní analýzu** (Využívá se jak v SEM, tak i v TEM)

Na (obr. 5.2.1-1) je znázorněna mapa rozložení titanu v místě vady svarového spoje, sestrojena pomocí vlnově disperzní rtg mikroanalýzy.



Obr. 5.2.1-1 Mapa rozložení titanu v místě vady svarového spoje

Na (obr. 5.2.1-2) je pak zobrazeno chemické složení určité oblasti vzorku pomocí píků (energieově disperzní rtg mikroanalýzou). Obsah jednotlivých prvků je identifikován přiřazením píků odpovídajících prvkům na základě jejich charakteristické energie.



Obr. 5.2.1-2 Lokální chemické složení materiálu vyjádřené pomocí píků

6 Vyhodnocení jednotlivých vzorků

V následujících podkapitolách jsou klasifikovány jednotlivé vady, které se vyskytly ve čtyřech vzorcích svarových spojů. Dále je určeno, zda vady vznikly během procesu svařování, nebo během samotného provozu zařízení, a také je stanovena pravděpodobná příčina jejich vzniku. Jak jsem již uvedl v úvodu diplomové práce, postup pro zajištění a vyhodnocení vad byl následující:

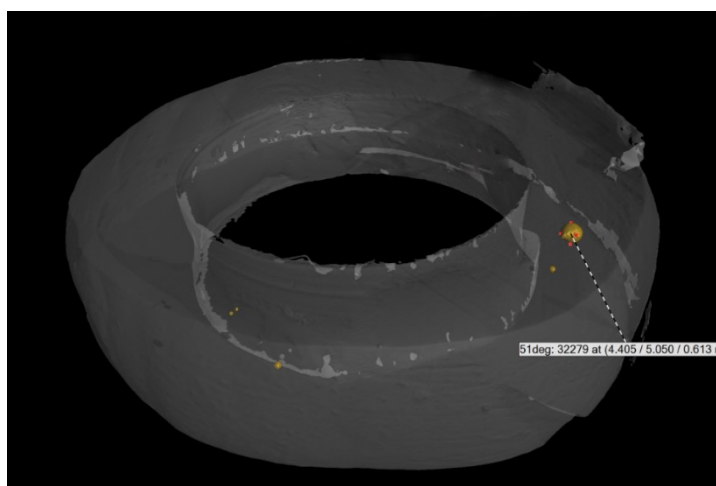
1. Zkouška prozářením – RTG záření.
2. Tomografické měření (CT).
3. Metalografické zkoušení (makrostruktura + mikrostruktura).
4. Zkoušení elektronovou mikroskopií

6.1 Vzorek č. 1

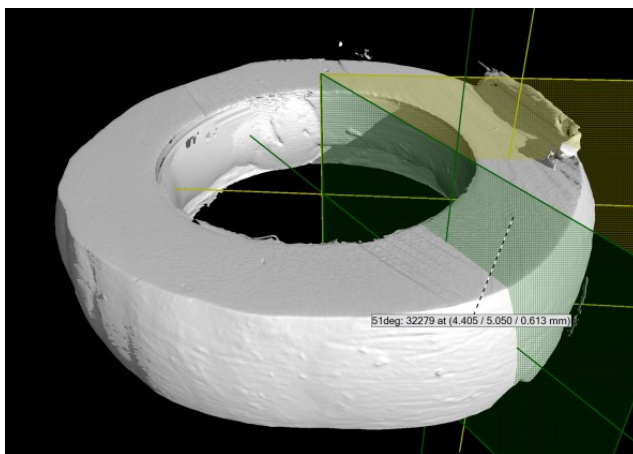
6.1.1 Charakteristika vad:

- přesazení – lineární přesazení mezi trubkami (5072)
- studený spoj (401)
- pór (2011)

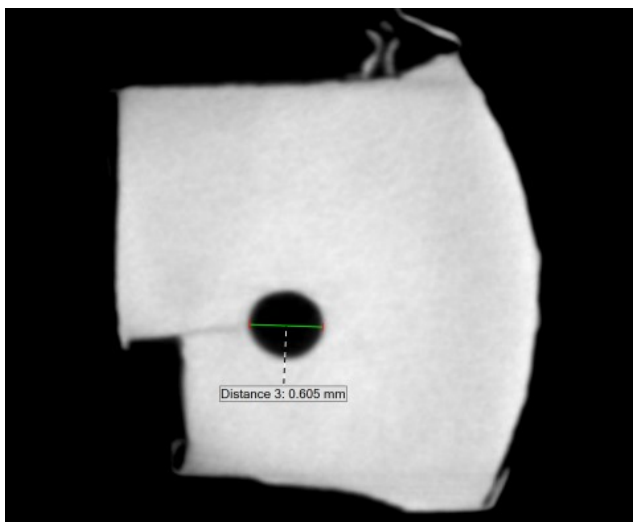
Rentgenové snímky signalizovaly přítomnost nepřipustných vad. Existence těchto vad byla následně potvrzena tomografickým měřením. Na (obr. 6.1-1) je zobrazen pór (2011). V místě vady (v rovině 51°) se provedl tomografický řez (obr. 6.1-2). Po detailnějším zhodnocení vady v řezu (obr. 6.1-3) byl pozorován pór velikosti 0,605 mm a dále taky přesazení jednotlivých trubek. Na snímku lze také pozorovat podezření na studený spoj. Tato vada, ale musela být potvrzena metalografickým zkoušením, respektive elektronovou mikroskopií. Na (obr. 6.1-4) je poté zobrazen boční pohled vady společně s její rozměrovou charakteristikou.



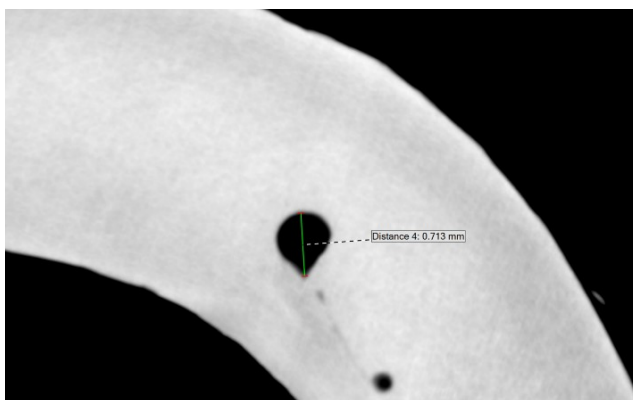
Obr. 6.1-1 Tomografické měření – pór



Obr. 6.1-2 Naznačení tomografického řezu (51°)



Obr. 6.1-3 Detail póru (0,605mm) + výrazné přesazení

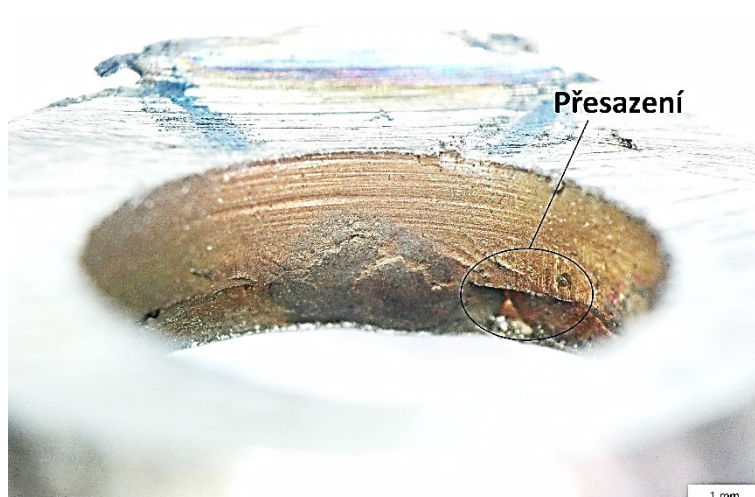


Obr. 6.1-4 Boční pohled - pór

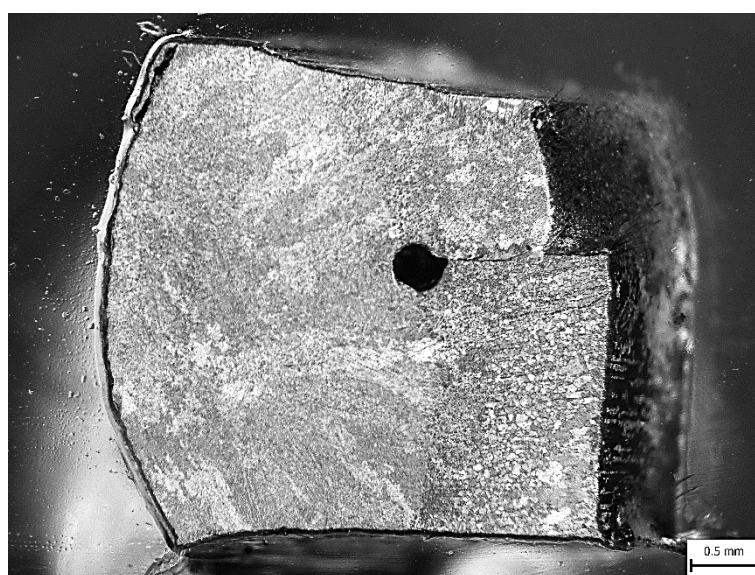
Metalografická zkouška potvrdila výše zmíněné vady. Na (obr. 6.1-5) je vzorek svarového spoje se zaznačenými místy řezu. Z (obr. 6.1-6) je patrné výrazné přesazení jednotlivých trubek. Jedná se o vadu způsobenou hrubým porušením přípravy před samotným svařováním. Na (obr. 6.1-7) je patrný pór kruhového tvaru společně s náznakem studeného spoje.



Obr. 6.1-5 Naznačené řezy pro metalografickou zkoušku



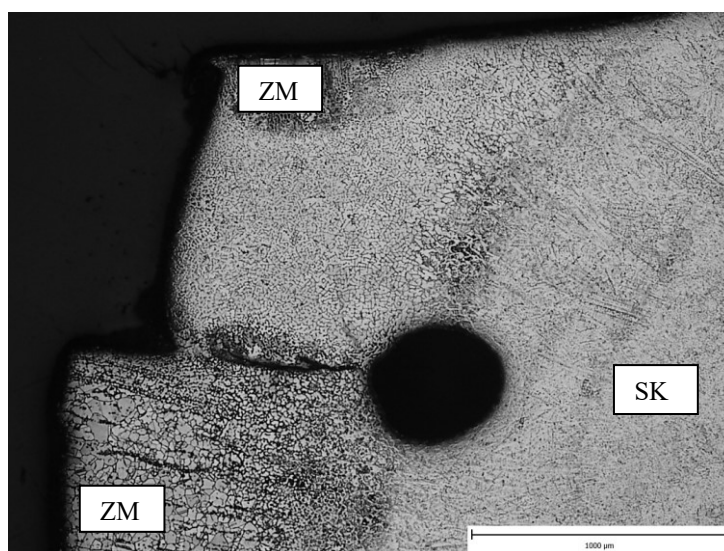
Obr. 6.1-6 Pohled na vnitřní stranu potrubí – výrazné přesazení



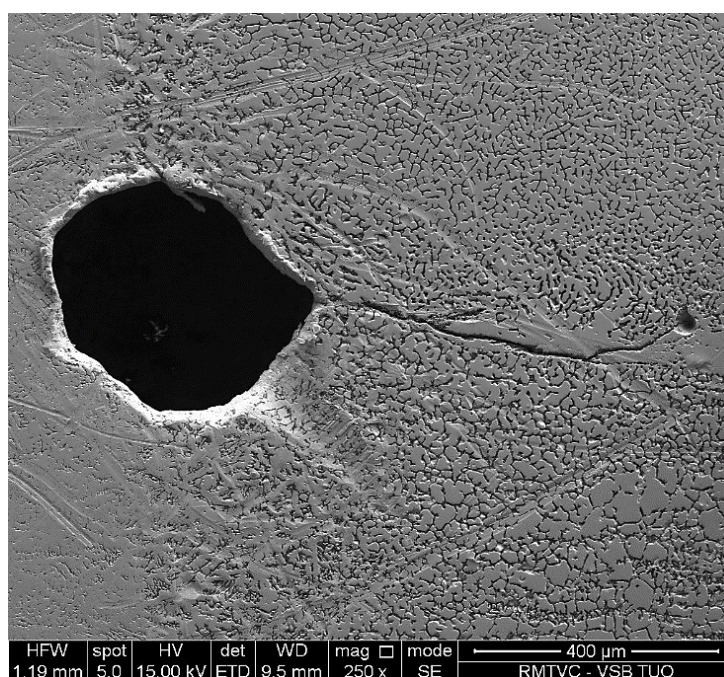
Obr. 6.1-7 Makrostruktura plochy řezu

Pomocí elektronové mikroskopie se podařilo zjistit řadu informací vypovídajících o tom, zda vada vznikla během procesu svařování, nebo během samotného provozu zařízení.

Na (obr. 6.1-8) je znázorněna poloha zkoumaných vad. Ze snímku je patrné výrazné přesazení jednotlivých trubek. Z mikrostruktury vzorku je také patrná přítomnost δ -feritu v okolí studeného spoje. Na (obr. 6.1-9) je pomocí sekundárních elektronů zobrazena topografie póru a studeného spoje. Z mikrostruktury je zřejmé, že se pór nachází na rozhraní mezi svarovým kovem a základním materiálem. Nekovová výplň v póru nebyla během měření pozorována.

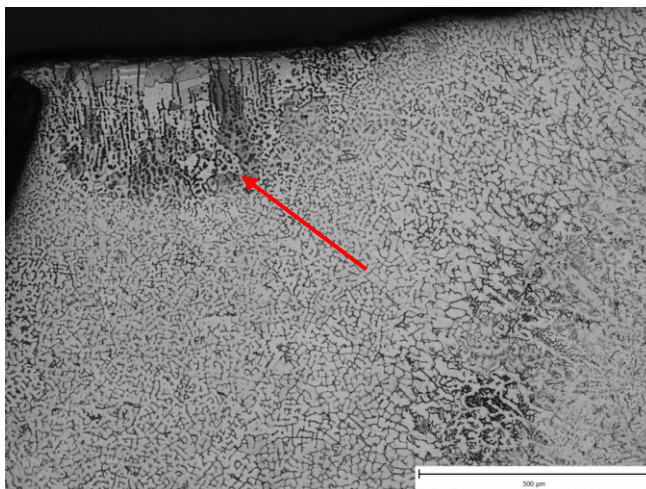


Obr. 6.1-8 Poloha vad



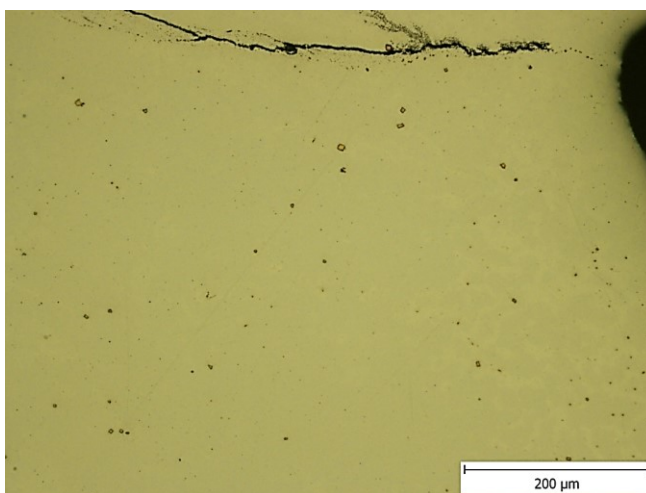
Obr. 6.1-9 Topografie vad

Na (obr. 6.1-10) lze v levém horním rohu pozorovat mikrostrukturu základního materiálu, který byl během svařování teplotně ovlivněn.



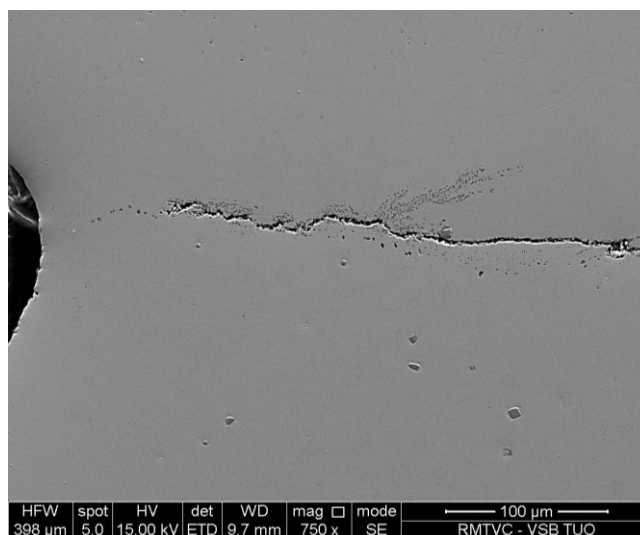
Obr. 6.1-10 Mikrostruktura ovlivněného ZM

Z (obr. 6.1-11) je patrná přítomnost částic TiX v základním materiálu. Tyto částice, stejně jako ostatní precipitáty brání růstu zrn. Většina precipitátů se při vysokých teplotách rozpustí, částice TiX mají ovšem vysokou teplotu tavení, proto nedošlo k výraznému růstu (zhrubnutí) zrn. Díky přítomnosti jemnozrnější struktury se studený spoj dále nešířil.

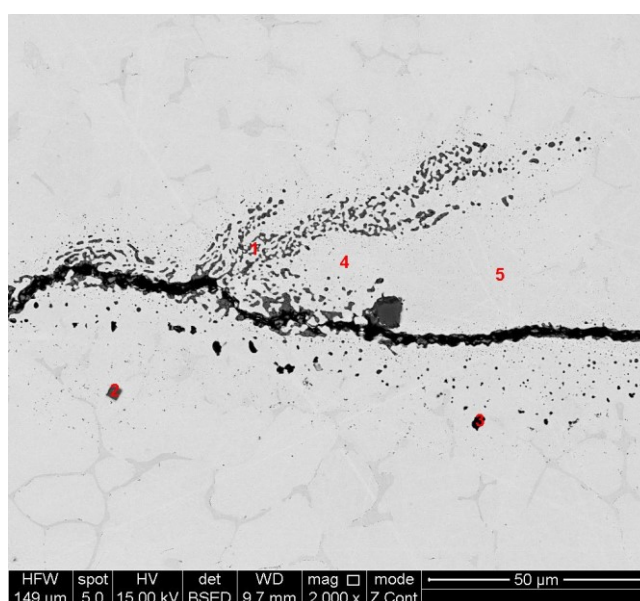


Obr. 6.1-11 Distribuce částic TiX v oblasti pod studeným spojem

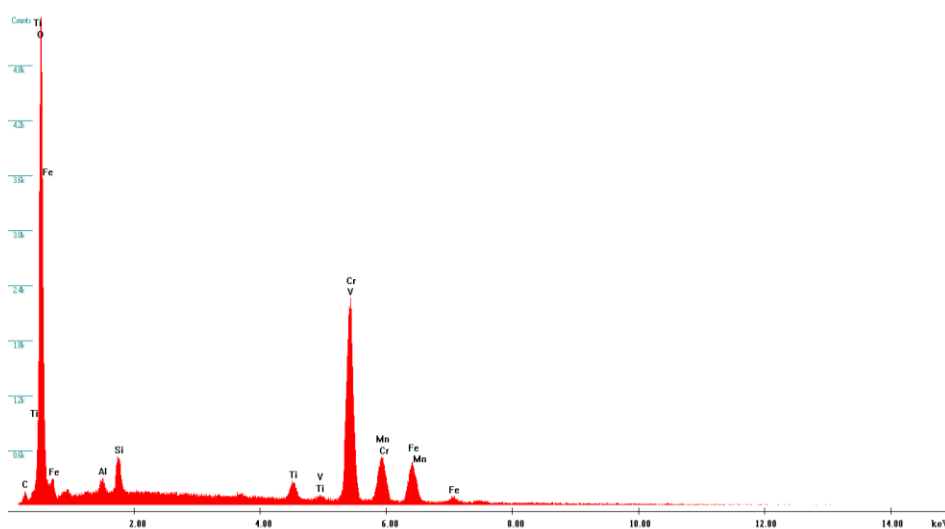
Studený spoj je lemován stopy nekovových částic (obr. 6.1-12). Při měření rtg spektrální mikroanalýzou bylo zjištěno, že se jedná o komplexní oxidy hliníku, titanu, chromu, manganu a železa. Na (obr. 6.1-13) jsou zaznačeny oblasti, které byly měřené rtg spektrální mikroanalýzou a na (obr. 6.1-14) je znázornění chemického složení oblasti č. 1 pomocí píků. V (tab. 6.1-1) je pak uvedeno chemické složení všech měřených oblastí.



Obr. 6.1-12 Nekovové částice okolo studeného spoje



Obr. 6.1-13 Oblasti měřené rtg spektrální mikroanalýzou

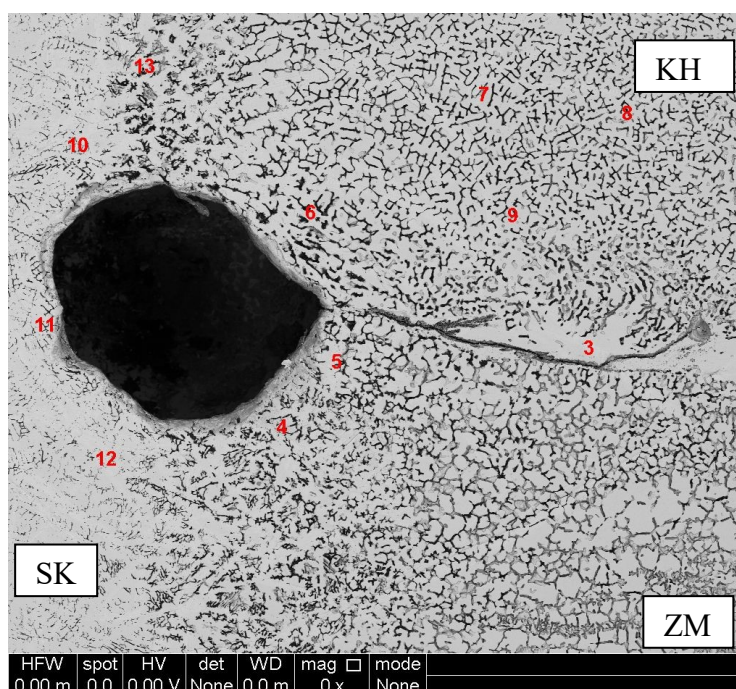


Obr. 6.1-14 Chemické složení – oblast č. 1

Tab. 6.1-1 Chemické složení měřených oblastí v [%]

Pozice	O	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
1	30,2	0,8	1,9	2,3	44,5	6,7	13,6	0
2	28	0,7	0,7	0,5	19,3	1,4	66	12,5
3	25,5	26,6	2,1	9,3	8,7	1,2	26,6	0
4	0	0	0,4	0	16,9	0,7	71,7	10,3
5	0	0	0,6	0	18,1	1,2	70,4	9,7

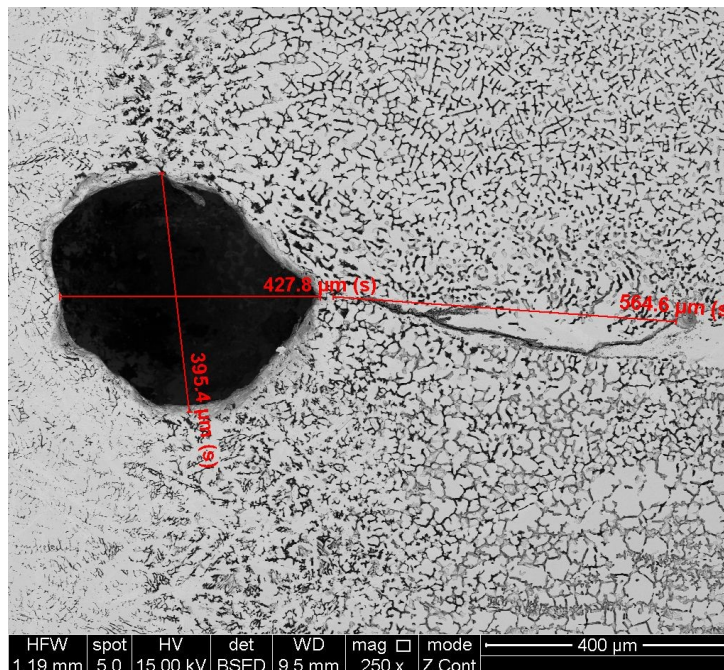
Na (obr. 6.1-15) jsou vyznačeny oblasti měření rtg spektrální mikroanalýzou kovové matrice. Na levé straně snímku lze pozorovat typické vyloučení útvarů δ -feritu ve svarovém kovu (v mezidendritických prostorách). Protože byla kořenová housenka teplotně ovlivněná následně položenou housenkou, distribuce útvarů δ -feritu v této oblasti kořenové housenky neodpovídá typické lici struktury svarového kovu. (Tab. 6.1-2) udává chemické složení měřených oblastí svarového kovu v okolí póru. (Tab. 6.1-3) pak udává chemické složení měřených oblastí v kořenové svarové housence. Na (obr. 6.1-16) je vyznačena rozměrová charakteristika zkoumaných vad.

*Obr. 6.1-15 Oblasti měřené rtg spektrální mikroanalýzou**Tab. 6.1-2 Chemické složení SK v okolí póru v [%]*

Pozice	Si	Mo	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
10	0,9	1,4	0,4	19,1	1	65,5	11,7
12	0,9	1,5	0,5	18,6	2,1	63,7	12,7

Tab. 6.1-3 Chemické složení kořenové housenky v [%]

Pozice	Si	Mo	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
7	0,9	1	0,6	17,3	1,4	63	11
8	0,7	1	0,7	18,3	1,4	66,6	11,3
9	0,7	0,7	0,5	17,9	1,7	67,4	11,1

*Obr. 6.1-16 Rozměrová charakteristika vad*

6.1.2 Shrnutí

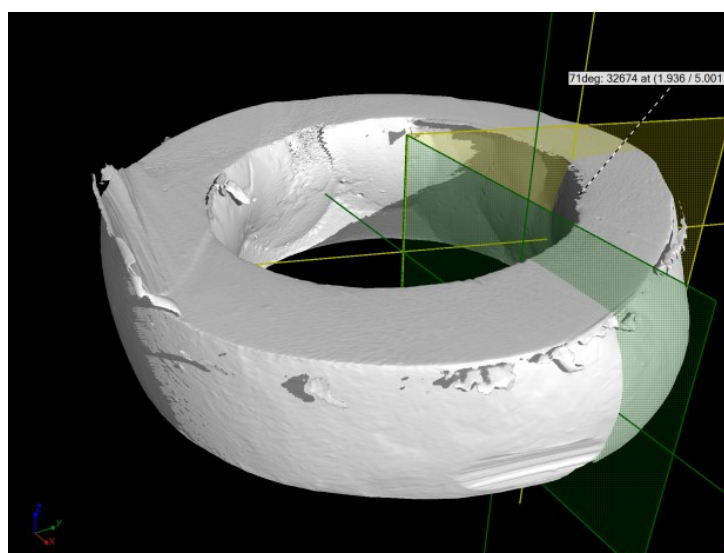
Studený spoj se šířil na rozhraní mezi kořenovou housenkou a základním materiálem až k rozměrnému póru, který se nacházel na rozhraní mezi svarovým kovem a základním materiálem v oblasti přežíhané následující housenkou. Oba tyto defekty vznikly během procesu svařování a během provozu zařízení se již dále nešířily. Za příčinu vzniku póru lze považovat nedokonalou ochranu svarového kovu inertním plynem (příliš nízké, nebo vysoké hodnoty průtoku ochranného plynu). Při vysokých hodnotách průtoku ochranného plynu mohlo dojít ke vzniku turbulentního proudění a k nasátí okolní atmosféry do místa svařování. Na vzorku bylo také pozorováno přesazení jednotlivých trubek. Tato vada, jak již bylo zmíněno výše, byla způsobeno hrubým porušením přípravy před samotným svařováním.

6.2 Vzorek č. 2

6.2.1 Charakteristika vad:

- pór vyplněný oxidy (2011)
- shluk pórů propojených oxidy (2013)

Zkouška prozářením svarového spoje signalizovala pouze existenci póru (2011). Tento defekt byl také následně potvrzen tomografickým měřením a v místě výskytu vady byl proveden tomografický řez svarovým spojem v rovině 71° (obr. 6.2-1). Na (obr. 6.2-2) je znázorněn pór o velikosti 0,24 mm. Druhý defekt (shluk pórů propojených oxidy), který byl detekován pomocí metalografického zkoušení, nebyl během tomografického měření pozorován.



Obr. 6.2-1 Naznačení tomografického řezu (71°)

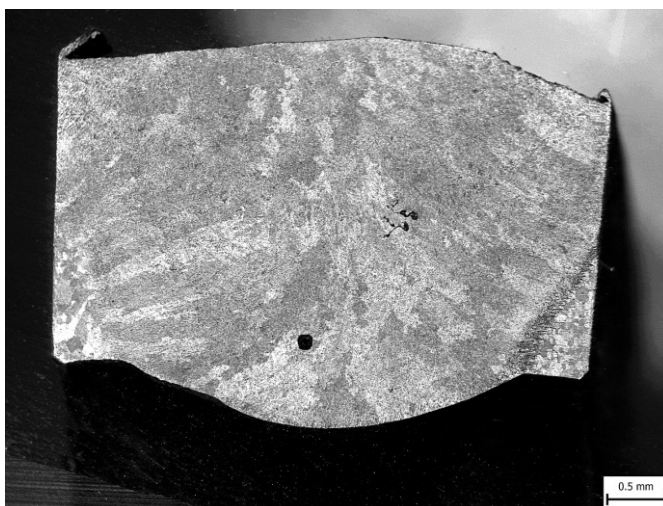


Obr. 6.2-2 Rozměrová charakteristika póru

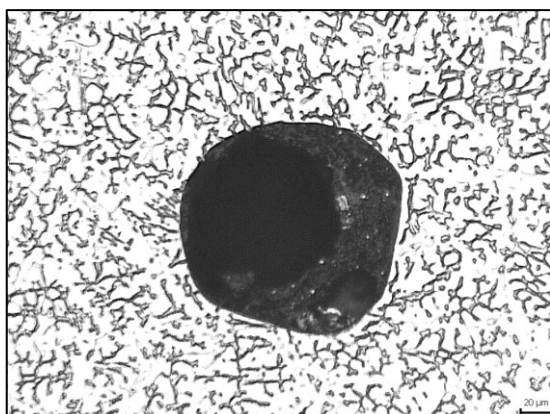
Na (obr. 6.2-3) je zachycen vnitřní povrch svaru daného vzorku potrubí. Po provedení řezu, vyleštění ploch a naleptání struktury, se pomocí metalografického zkoušení potvrdila přítomnost póru (2011) ve svarovém kovu a navíc byla detekována i další vada, která byla charakterizována jako shluk pórů propojených oxidy (2013). Obě zmíněné vady jsou zobrazeny na (obr. 6.2-4). Na (obr. 6.2-5) a (obr. 6.2-6) je pak zobrazen detail těchto vad.



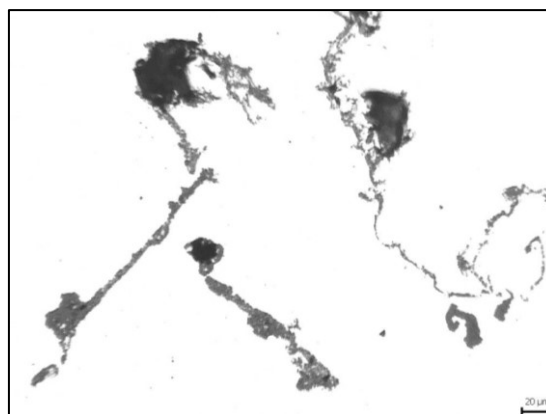
Obr. 6.2-3 Vnitřní povrch svarového spoje



Obr. 6.2-4 Defekty ve svarovém kovu

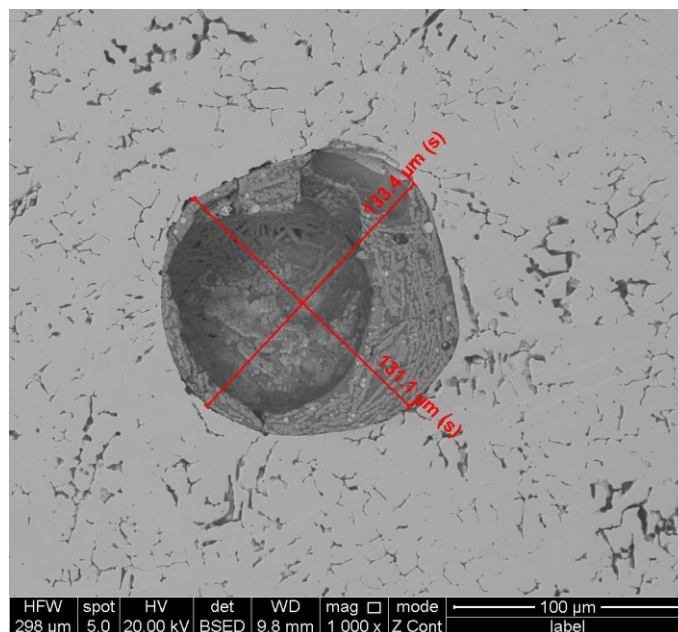


Obr. 6.2-5 Detail póru

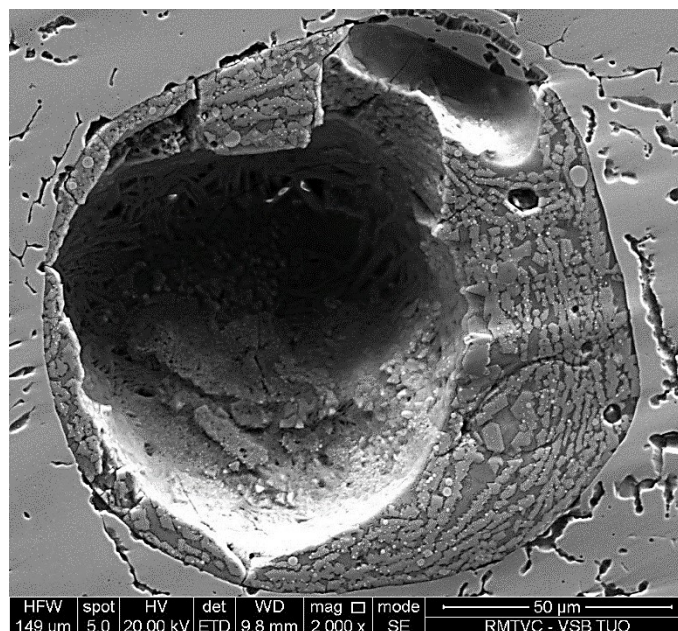


Obr. 6.2-6 Detail pórů propojených oxidy

Na (obr. 6.2-7) jsou znázorněné charakteristické rozměry póru, který byl částečně vyplněn nekovovou hmotou. Na (obr. 6.2-8) lze pak pomocí sekundárních elektronů pozorovat topografii zmíněné vady. Vlákna, které se vyskytovaly na dně póru, pocházejí z leštících podložek. Jedná se tedy o artefakty, které byly do vady zaneseny během přípravy vzorku před samotným zkoušením elektronovou mikroskopií. Tyto artefakty pak zamezily možnosti detekce částic uvnitř vady.



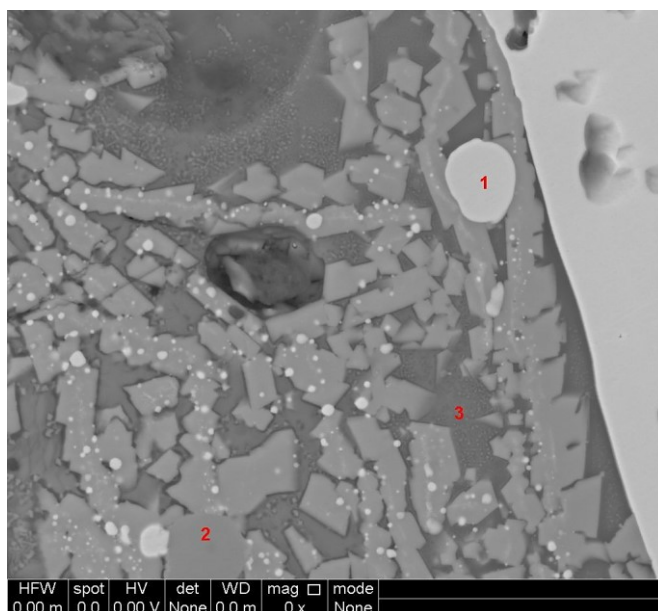
Obr. 6.2-7 Rozměrová charakteristika póru



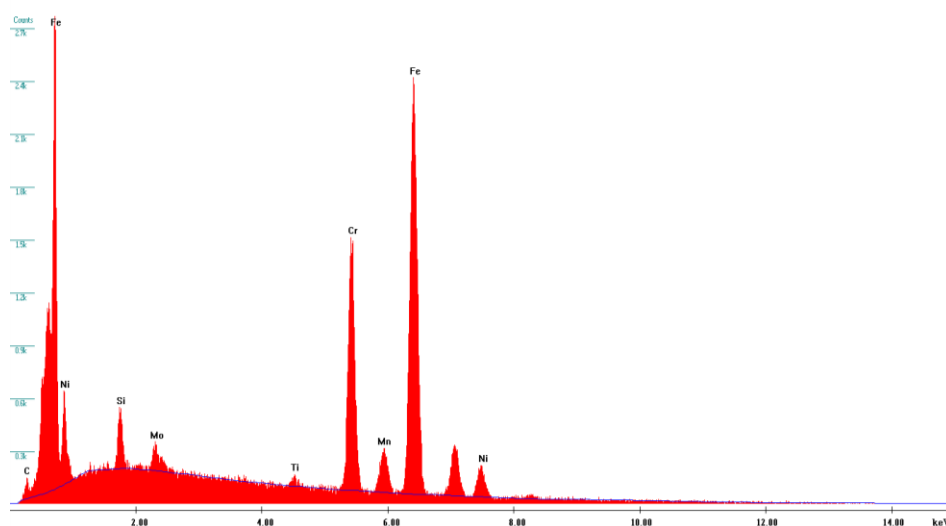
Obr. 6.2-8 Topografie póru

V režimu zpětně odrážených elektronů lze na (obr. 6.2-9) pozorovat chemickou heterogenitu studovaného defektu. Globulární částice světlého kontrastu odpovídají zarostlým

nekovovým částicím. Rtg spektrální mikroanalýzou se následně zjistilo chemické složení jednotlivých částic. V oblastech tmavšího kontrastu lze pozorovat komplexní oxidy obohacené o křemík a naopak v oblastech světlejšího kontrastu lze pak pozorovat oxidy obohacené chromem a manganem. Na (obr. 6.2-10) je zobrazení chemického složení v oblasti č. 1 pomocí píků a v (tab. 6.2-1) je pak uvedeno chemické složení v jednotlivých oblastech měření.



Obr. 6.2-9 Oblasti měření rtg spektrální mikroanalýzou

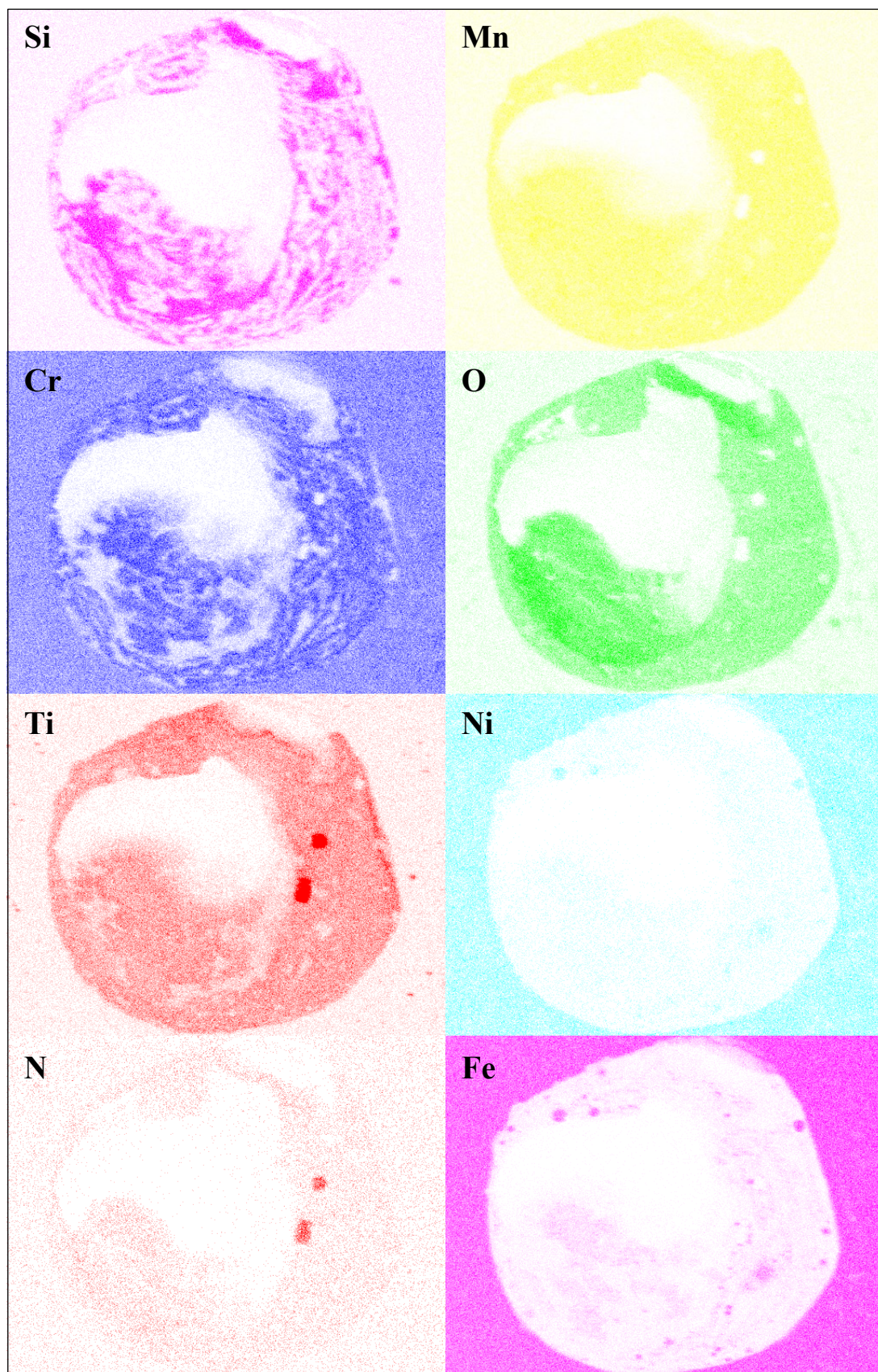


Obr. 6.2-10 Chemické složení – oblast č.1

Tab. 6.2-1 Chemické složení měřených oblastí v [%]

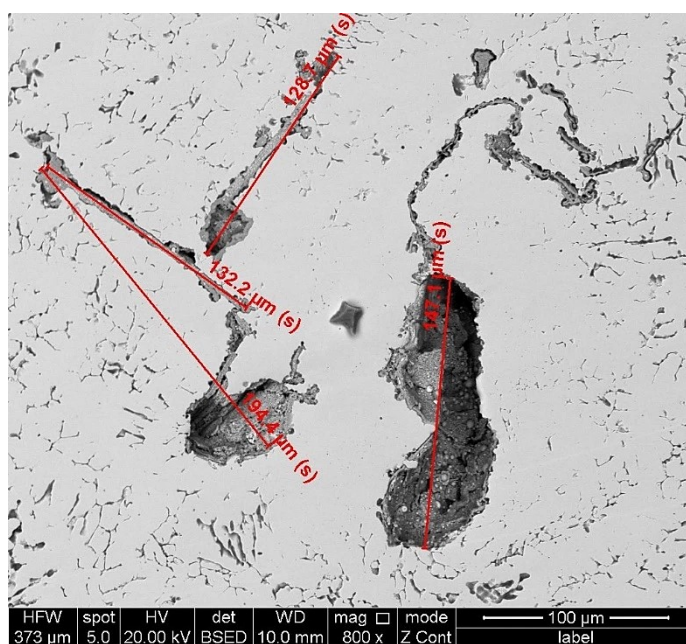
Pozice	O	N	Na	Al	Si	Mo	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
1	0	0	0	0	1,5	1,6	0,6	22	2	63,7	8,6
2	0	16,5	0	0	0	0	82,6	0,9	0	0	0
3	32	0	1,3	4,7	27,5	0	3,4	4,2	26,9	0	0

Na (obr. 6.2-11) je dokumentovaná plošná distribuce jednotlivých prvků ve studované nečelistvosti.

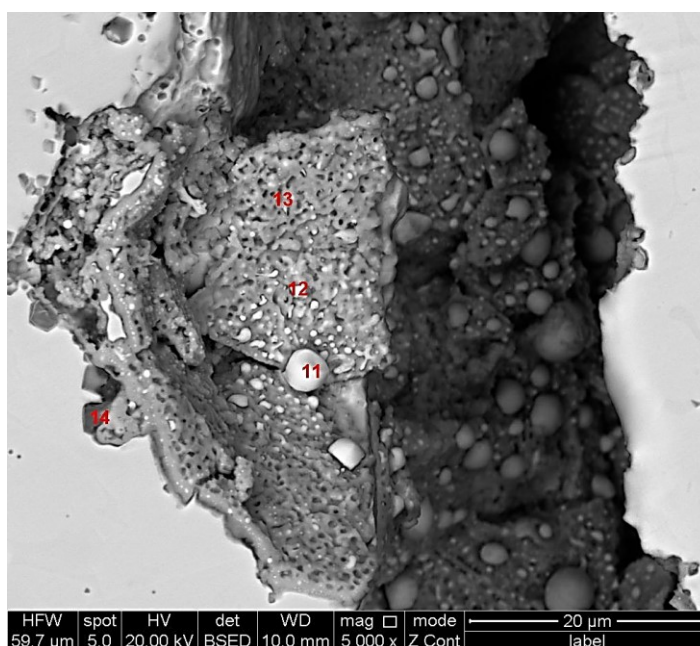


Obr. 6.2-11 Plošné rozložení vybraných prvků v oblasti defektu (póru)

Na (obr. 6.2-12) je zobrazen shluk necelistvostí (pórů) ve svarovém kovu vyplněných nekovovou hmotou společně s rozměrovou charakteristikou dané vady. Zvýšený výskyt nekovových vměstků v okolí této necelistvosti nebyl zjištěn. Na (obr. 6.2-13) lze stejně jako u předchozího defektu pozorovat v zobrazení pomocí zpětně odrážených elektronů tmavé kontrasty, které odpovídají zarostlým kovovým částicím. Chemické složení těchto částic bylo podobné chemickému složení svarového kovu. Oxidická výplň v defektu byla tvořena komplexními oxidy chromu, manganu a železa. Na snímku jsou rovněž zaznačeny oblasti měření rtg spektrální mikroanalýzou.

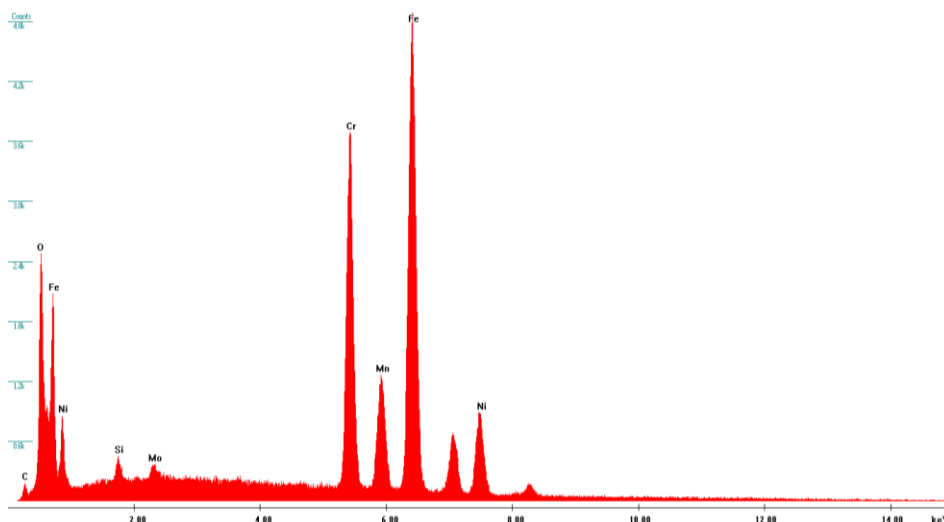


Obr. 6.2-12 Rozměrová charakteristika vady



Obr. 6.2-13 Oblasti měřené rtg spektrální mikroanalýzou

Na (obr. 6.2-14) jsou zobrazeny hodnoty chemického složení v jedné z měřených oblastí pomocí píků a v (tab. 6.2-2) je pak uvedeno chemické složení v jednotlivých oblastech měření.



Obr. 6.2-14 Chemické složení – oblast č. 11

Tab. 6.2-1 Chemické složení měřených oblastí v [%]

Pozice	O	Si	Mo	Cr	Mn	Fe	Ni
11	6,5	0,7	1	23	6,9	48,5	13,4
12	9,4	1,3	1,5	29,5	11,8	41,7	4,8
13	19,3	2	1,7	39,9	20,1	15,5	1,5
14	7,1	1,9	2,3	17,6	1,9	59,2	10

6.2.2 Shrnutí

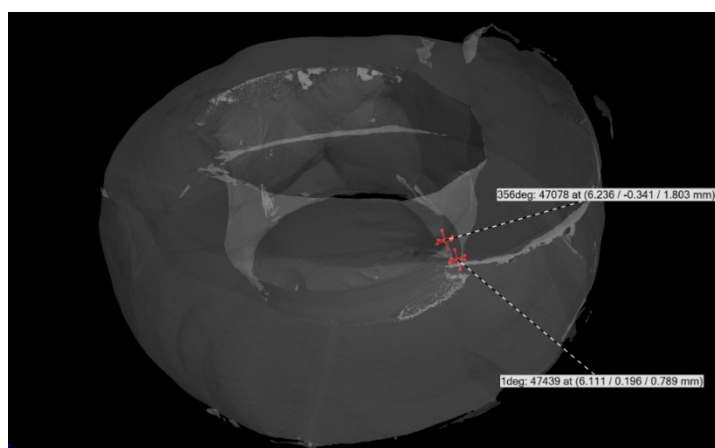
Všechny defekty (póry), které byly pozorovány v tomto vzorku, byly vyplněny oxidickými produkty obohacené zejména chromem, manganem a železem. V těchto oxidech byly zarostlé kovové částice s velice podobným chemickým složením, jako má svarový kov. Z tohoto důvodu lze usuzovat, že vady vznikly během svařování a při samotném provozu zařízení se již dále nešířily. Přesněji pak vady vznikly během krystalizace a ochlazování, kdy dochází ke snížení rozpustnosti kyslíku ve svarovém kovu. Za přítomnost kyslíku ve svarovém kovu nejpravděpodobněji může nedostatečná ochrana svarového kovu ochranným plynem. Chemické složení zmíněných oxidů pak souvisí s afinitou jednotlivých prvků ke kyslíku.

6.3 Vzorek č. 3

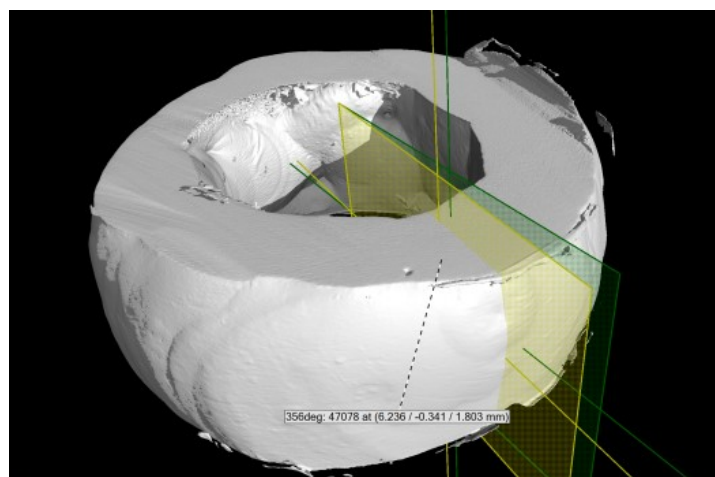
6.3.1 Charakteristika vad:

- studený spoj (401)

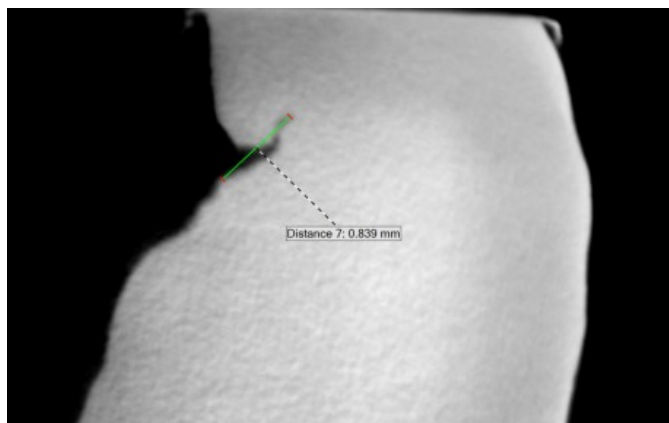
Zkouška prozářením tohoto vzorku nesignalizovala žádnou vadu svarového spoje. Tomografickým měřením byly ovšem zjištěny dvě vady. V prvním případě byla vada klasifikovaná jako vnitřní vrub o velikosti 0,8 mm a v druhém případě pak jako vnitřní povrchová vada do 0,9 mm. Prvně zmíněná vada (vnitřní vrub do 0,8 mm) byla po metalografickém zkoušení přesněji klasifikována jako studený spoj (401). Z (obr. 6.3-1) je patrné, že se vady nacházely v těsné blízkosti (356° a 1°). Při dělení vzorku se pak právě díky této blízkosti druhá vada znehodnotila, a proto je v dalších částech této kapitoly popisována jen první vada, tedy studený spoj (401). Na (obr 6.3-2) je zobrazen tomografický řez vzorkem v rovině 356° . Na (obr. 6.3-3) je poté zobrazen detail první vady společně s její rozměrovou charakteristikou.



Obr. 6.3-1 Tomografické měření – Vady v oblastech 1° a 356°



Obr. 6.3-2 Naznačení tomografického řezu (356°)

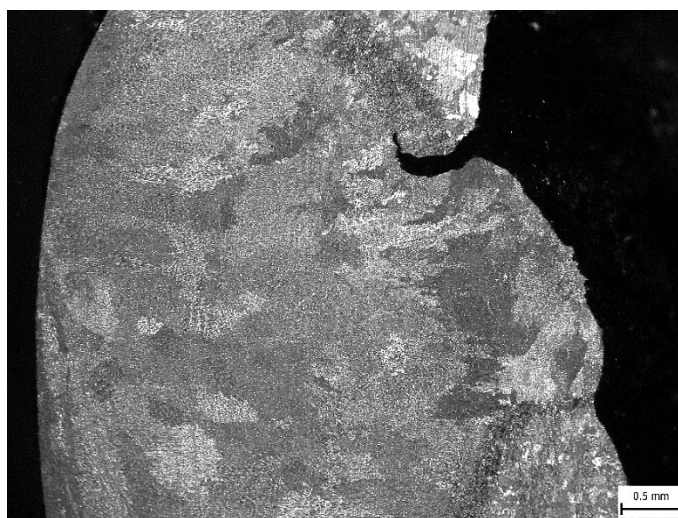


Obr. 6.3-3 Detail vady – rozměrová charakteristika

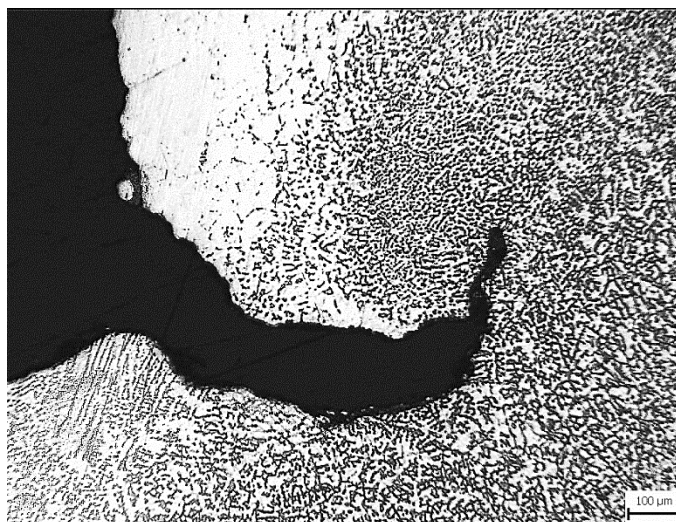
Na (obr. 6.3-4) je zobrazen detail vnitřního povrchu vzorku svarového spoje. Po provedení metalografického řezu, vyleštění a naleptání plochy řezu je patrná přítomnost výše zmíněné vady, tedy studeného spoje (obr. 6.3-5). Na (obr. 6.3-6) je poté zobrazen detail studeného spoje, který se podle struktury materiálu nachází mezi základním materiálem a svarovým kovem.



Obr. 6.3-4 Vnitřní povrch vzorku

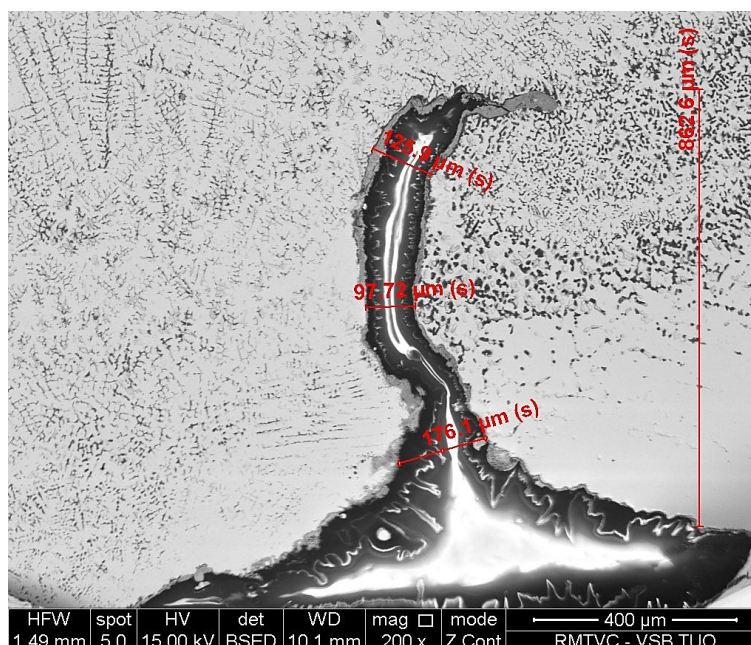


Obr. 6.3-5 Studený spoj

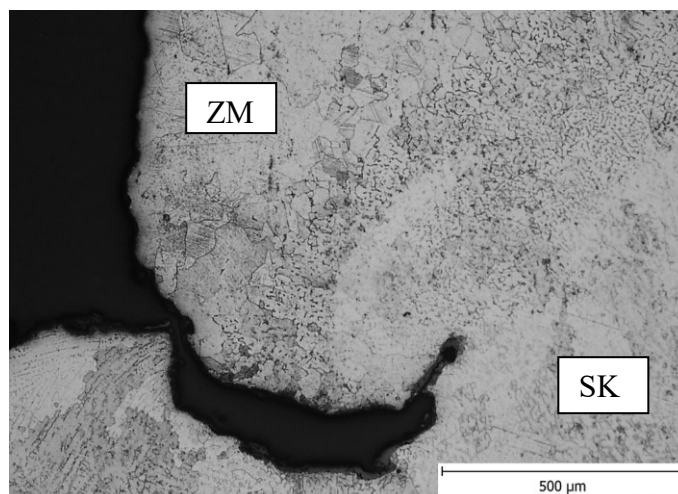


Obr. 6.3-6 Detail studeného spoje

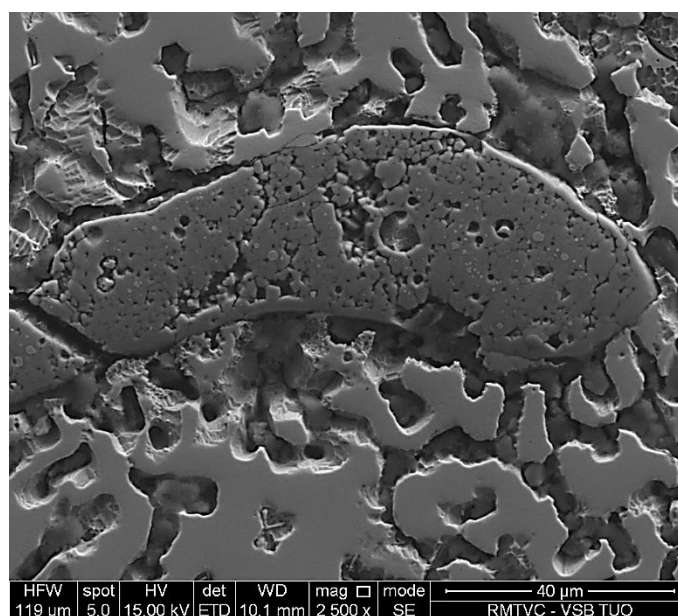
Na (obr. 6.3-7) je zobrazen studený spoj společně se svou rozměrovou charakteristikou. Světlá oblast uvnitř vady je důsledek nabíjení částic na nevodivý bakelit, který byl použit jako fixační hmota vzorků. Na (obr.6.3-8) lze podle charakteristiky mikrostruktury potvrdit, že vada vznikla a dále se i šířila na rozhraní mezi základním materiálem a svarovým kovem. Na (obr. 6.3-9) je zobrazena nekovová výplň, která se necházela v samotném kořeni studeného spoje. Na (obr. 6.3-10) je zobrazen výskyt nekovových vměstků a částic TiX, jenž se nacházely v oblasti zóny ztavení. Částice TiX se pak i ojediněle vyskytovaly v oblasti zakončení studeného spoje.



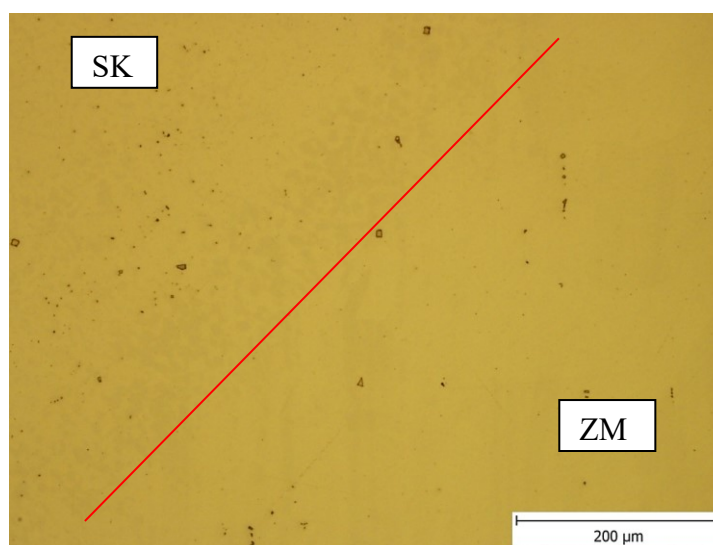
Obr. 6.3-7 Rozměrová charakteristika studeného spoje



Obr. 6.3-8 Mikrostruktura v oblasti studeného spoje

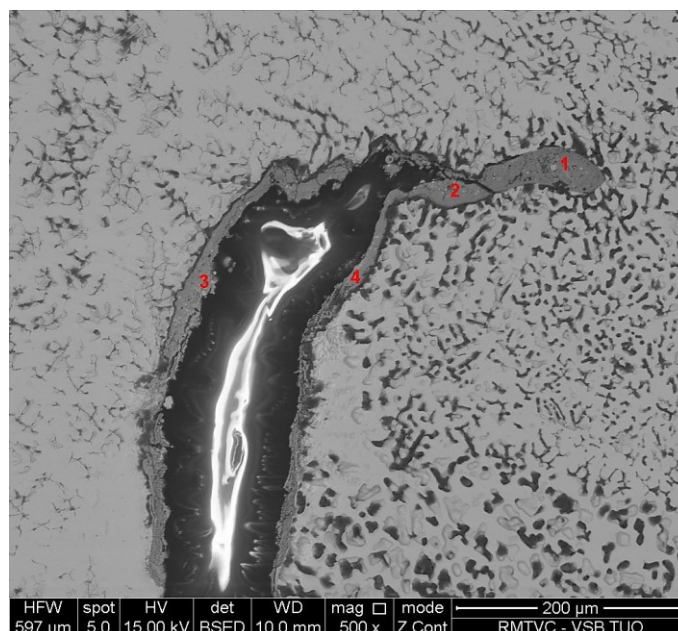


Obr. 6.3-9 Nekovová výplň v oblasti kořene studeného spoje

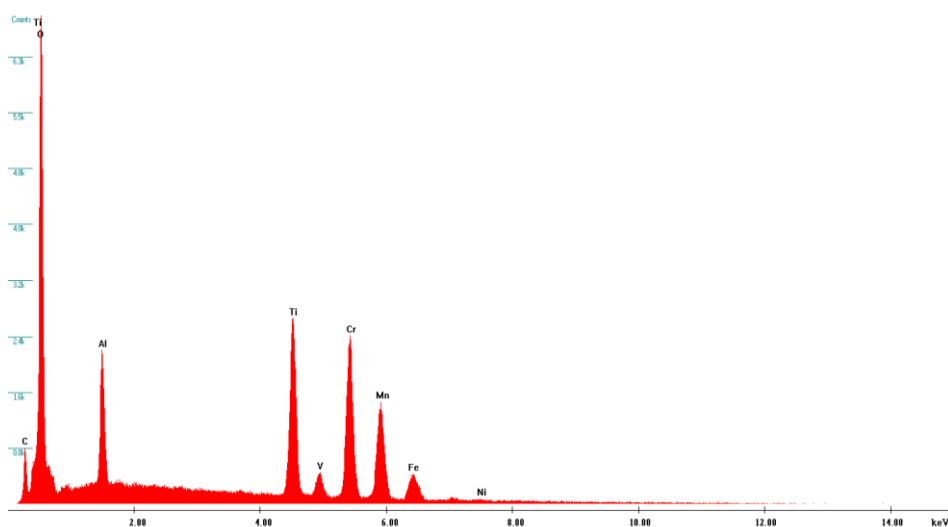


Obr. 6.3-10 Distribuce částic TiX v oblasti kolem hranice ztavení

Na (obr. 6.3-11) jsou znázorněny oblasti, které byly podrobeny měření rtg spektrální mikroanalýzou. Na (obr. 6.3-12) je zobrazeno chemického složení první oblasti pomocí píků a v (tab. 6.3-1) jsou pak zobrazeny hodnoty chemického složení jednotlivých měřených oblastí. Měření prokázalo, že se jedná o komplexní oxidy obohacené o prvky jako jsou titan, hliník, chrom, mangan, nebo železo, tedy o prvky s vysokou afinitou ke kyslíku.



Obr. 6.3-11 Oblasti měřené rtg spektrální mikroanalýzou

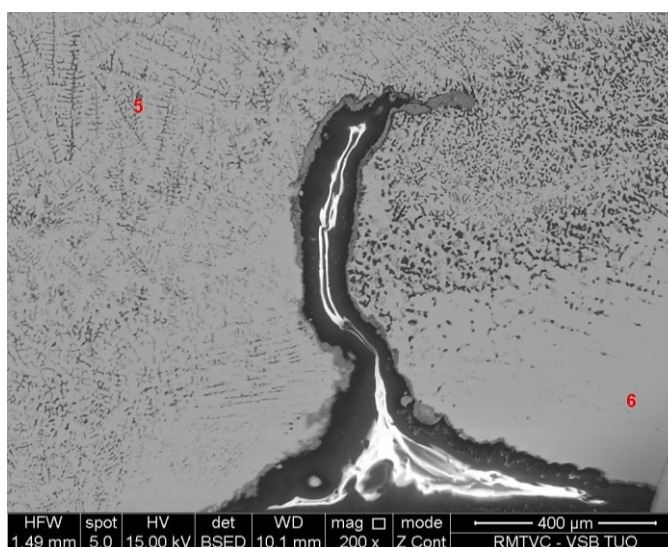


Obr. 6.3-12 Chemické složení – oblast č. 1

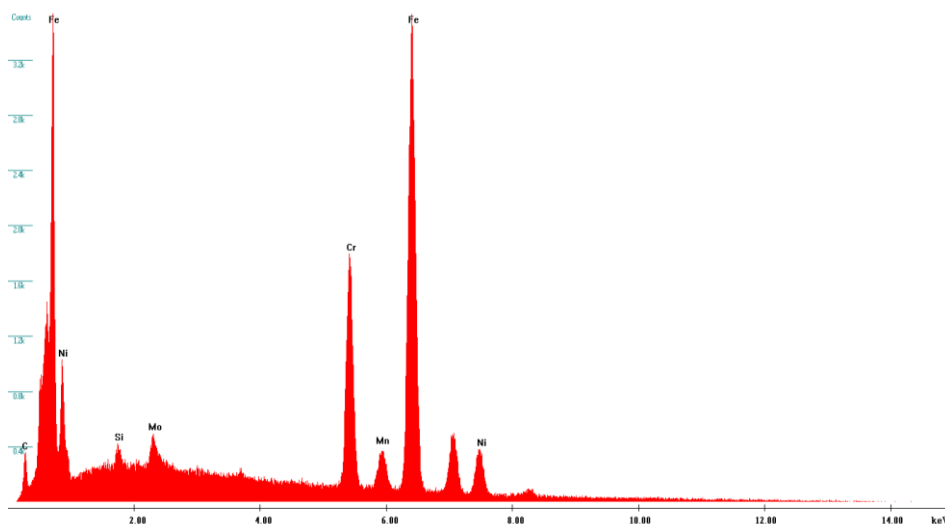
Tab. 6.3-1 Chemické složení měřených oblastí v [%]

Pozice	O	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
1	30,7	7,5	0	16,7	19,7	15,3	9,4	0,7
2	33,7	4,5	0	16,5	24,4	15,4	5,0	0,4
3	29,9	1,6	0,2	8,7	32,4	15,3	10,0	1,5
4	31,5	1,3	0	9,6	35,8	17,4	4,0	0

Na (obr. 6.3-13) lze pozorovat distribuci δ -feritu. Z tohoto hlediska je zřejmé že kořen studeného spoje zasahuje do zóny ztavení, kde je vyloučení δ -feritu výrazně odlišné od struktury litého svarového kovu, který obsahuje δ -ferit v mezidendritických prostorech. Na snímku jsou rovněž zaznačené oblasti měření chemického složení rtg spektrální mikroanalýzou. Na (obr. 6.3-14) je zobrazeno chemického složení oblasti č.5 pomocí píků a v (tab. 6.3-2) jsou pak uvedeny hodnoty chemického složení jednotlivých měřených oblastí.



Obr. 6.3-13 Vyloučení δ -feritu v jednotlivých oblastech svaru

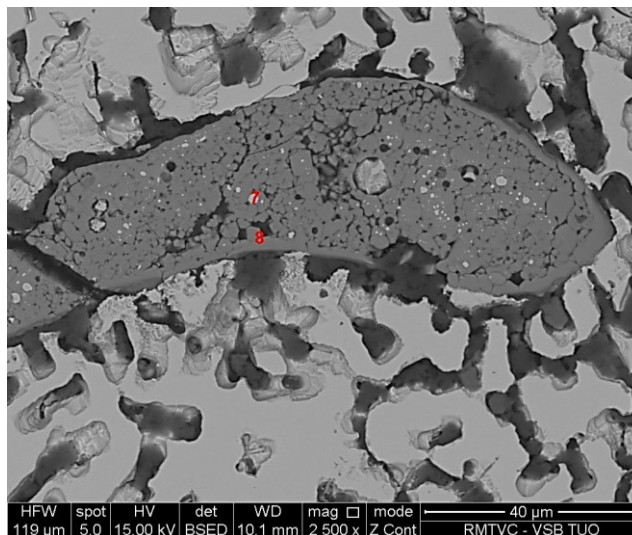


Obr. 6.3-14 Chemické složení – oblast č. 5

Tab. 6.3-2 Chemické složení měřených oblastí v [%]

Pozice	Si	Mo	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
5	0,5	1,8	0	18,7	1,9	65,4	11,7
6	0,4	0,5	0,4	18	1,7	69	9,9

Na (obr. 6.3-15) je zobrazena nekovová výplň v oblasti kořene studeného spoje. Kontrastní rozdíly mezi jednotlivými částmi výplně charakterizují její heterogenitu. Tmavé kontrasty odpovídají komplexním oxidům obohacené o hliník a titan. Naproti tomu světlé kontrasty, odpovídají globulárním kovovým částicím. Na snímku jsou rovněž zaznačeny oblasti měření pomocí rtg spektrální mikroanalýzy. V (tab. 6.3-3) jsou pak uvedeny hodnoty chemického složení měřených oblastí.



Obr. 6.3-15 Heterogenita výplně kořene studeného spoje

Tab. 6.3-3 Chemické složení měřených oblastí v [%]

Pozice	O	Al	Si	Mo	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
7	0	0,5	1,2	1,1	2,1	23,4	1,5	65,6	4,6
8	39,4	12,4	0	0	13,5	16,2	18,5	0	0

6.3.2 Shrnutí

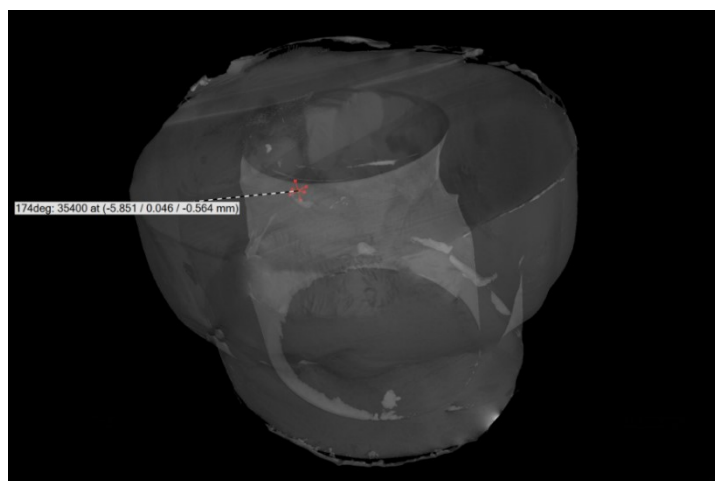
Z výsledků elektronové mikroskopie je patrné, že studený spoj vznikl na rozhraní mezi základním materiálem a svarovým kovem. Kořen studeného spoje přitom zasahuje do zóny ztavení. Studený spoj je po celé délce lemován nekovovou výplní, která je tvořena komplexními oxidy hliníku, titanu, chromu, manganu a železa. Nekovová výplň byla pozorována i v kořenu studeného spoje. Defekt jednoznačně vznikl během svařování a během provozu již k jeho růstu nedošlo. Možnou příčinou jeho vzniku mohou být nesprávně zvolené svařovací parametry, nebo také nesprávný průběh svařování – chyba svářeče.

6.4 Vzorek č.4

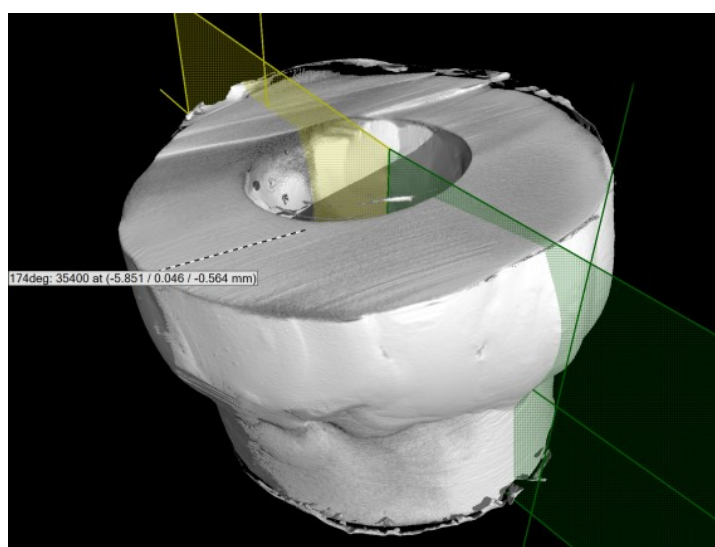
6.4.1 Charakteristika vad:

- přetečení kořenové vrstvy (5062)
- studený spoj v kořeni (4013)

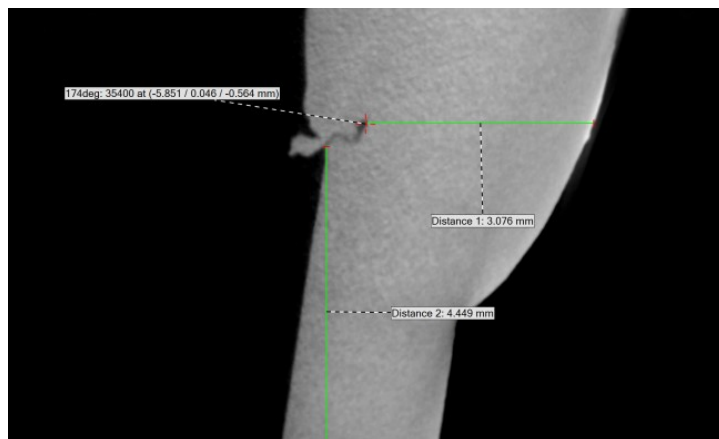
Tomografické měření potvrdilo výskyt vady (obr. 6.4-1), která byla signalizována zkouškou prozářením. Jedná se o povrchovou vadu o rozměru 0,75mm. Tato vada byla poté metalografickým zkoušením a zkoušením elektronovou mikroskopií blíže klasifikovaná jako vada přetečení kořenové vrstvy (5062) a studený spoj v kořeni (4013). Na (obr. 6.4-2) je zobrazen tomografický řez vzorkem v rovině 174°. Na (obr. 6.4-3) a (obr. 6.4-4) jsou pak vyobrazeny detaily jednotlivých vad společně s jejich rozměrovou charakteristikou a polohou vzhledem k vzorku svarového spoje.



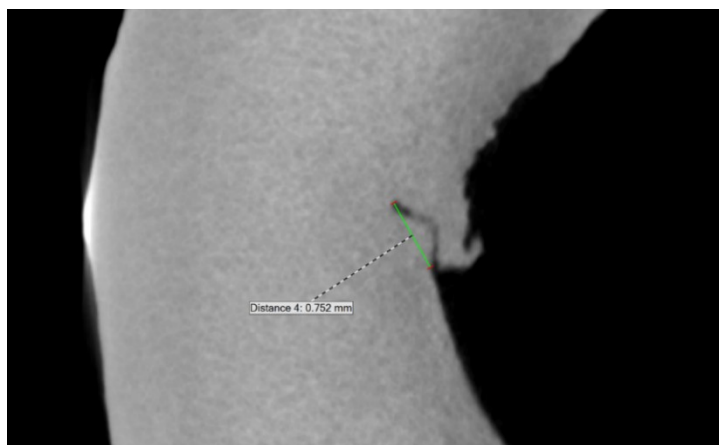
Obr. 6.4-1 Tomografické měření – výskyt vady



Obr. 6.4-2 Naznačení tomografických řezů (174°)



Obr. 6.4-3 Poloha vady

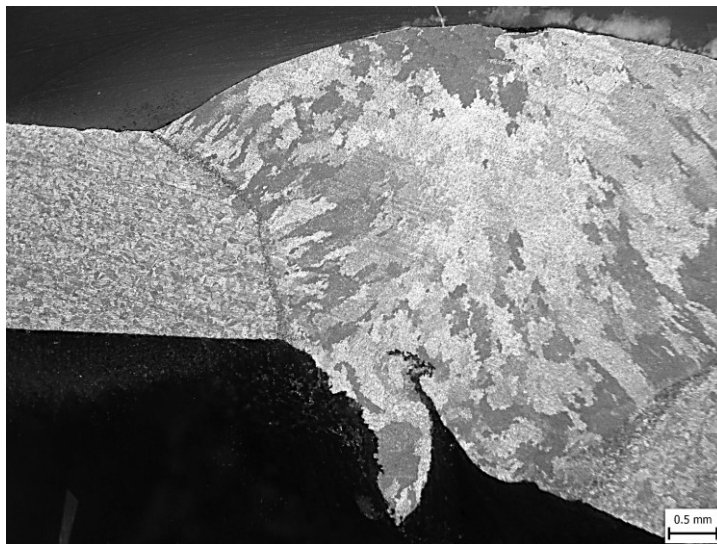


Obr. 6.4-4 Rozměrová charakteristika vady

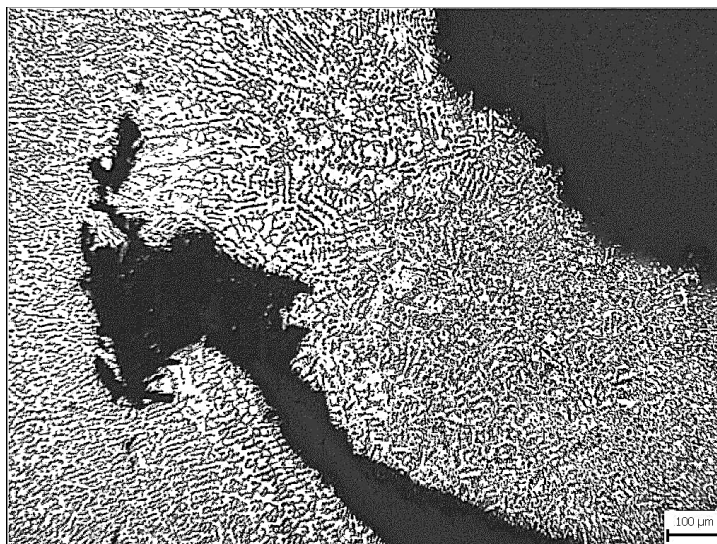
Na (obr. 6.4-5) je zobrazen vnitřní povrch vzorku, na kterém je patrné přetečení svarového kovu. Na (obr. 6.4-6) je znázorněna plocha řezu v místě vady, kterou je možné klasifikovat jako studený spoj v kořeni (4013). Na (obr. 6.4-7) lze pak pozorovat mikrostrukturu v oblasti studeného spoje.



Obr. 6.4-5 Vnitřní část vzorku – přetečení svarového kovu

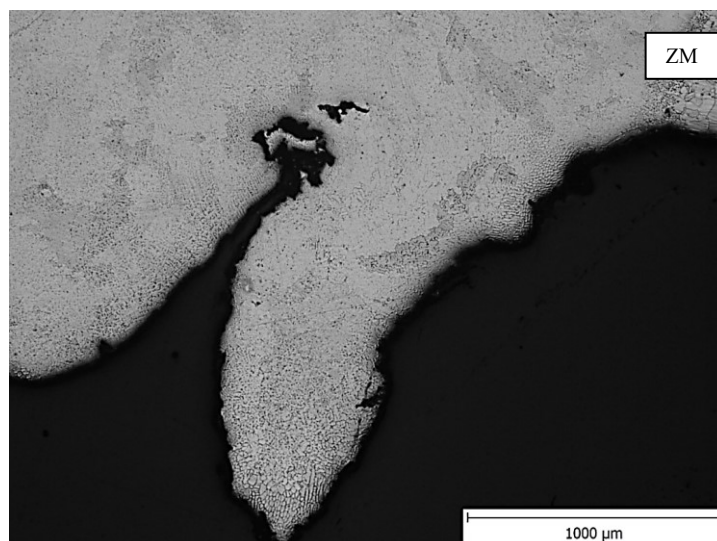


Obr. 6.4-6 Přetečení a studený spoj v kořeni

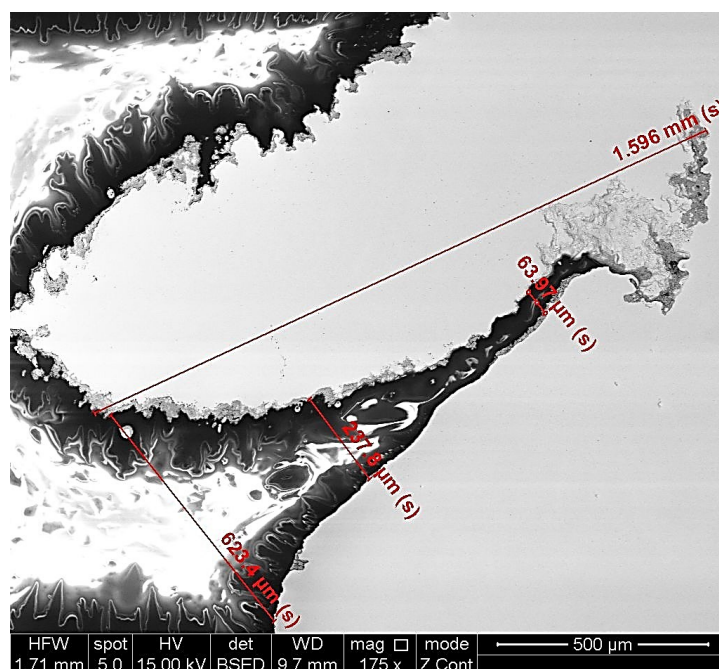


Obr. 6.4-7 Mikrostruktura v oblasti studeného spoje

Na (obr. 6.4-8) je znázorněna licí mikrostruktura svarového kovu v oblasti výskytu přetečení, respektive studeného spoje v kořenové oblasti svaru. V pravé, horní části snímku lze pozorovat hranici ztavení a strukturu základního materiálu. Na (obr. 6.4-9) lze pak pozorovat rozměrové charakteristiky studované vady. Světlá oblast uvnitř vady je důsledek nabíjení částic na nevodivý bakelit, který byl použit jako fixační hmota vzorků. Nejedná se tedy o produkty vzniklé během svařování, ani při provozu zařízení.



Obr. 6.4-8 Licí struktura svarového kovu

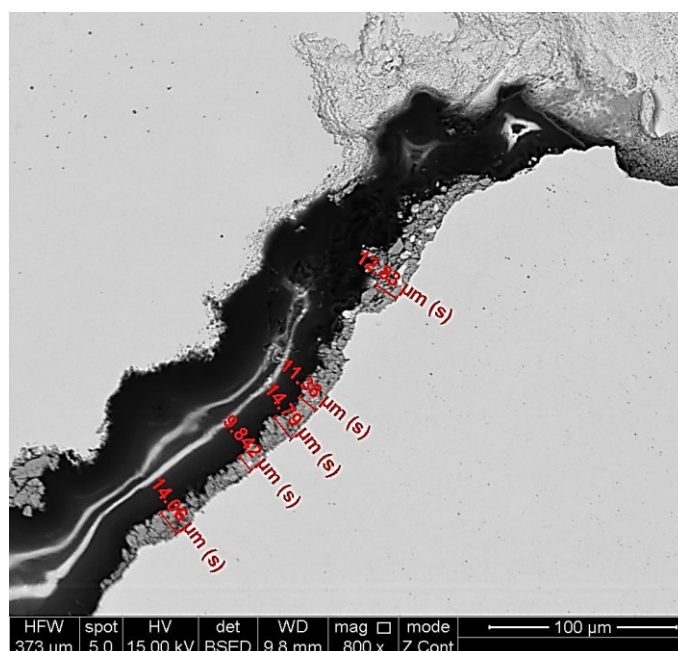


Obr. 6.4-9 Rozměrová charakteristika vady

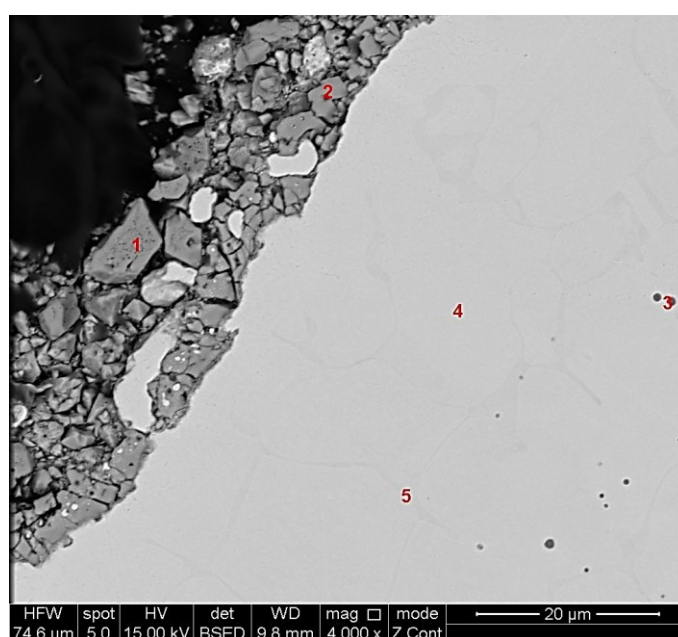
Studený spoj je lemován nerovnoměrnou vrstvou nekovové fáze se zarostlými kovovými částicemi (obr. 6.4-10). Tato oblast byla posléze podrobena měřením chemického složení rtg spektrální mikroanalýzou. Na (obr. 6.4-11) jsou zaznačeny oblasti, na kterých zmíněné měření proběhlo. Na (obr. 6.4-12) jsou pak zobrazeny hodnoty chemického složení oblasti č. 1 pomocí píků a v (tab. 6.4-1) je uvedeno chemické složení všech měřených oblastí. Z výsledků rtg spektrální mikroanalýzy je patrné, že nekovová vrstva lemující vadu studeného spoje, je tvořena částicemi komplexních oxidů manganu, chromu a titanu. V oxidické vrstvě na povrchu studeného spoje, ale i v zarostlých kovových částicích byla pozorována přítomnost malého množství mědi, která se do svarového kovu pravděpodobně dostala z použitého přídavného materiálu. V licí mikrostruktuře svarového kovu se vyskytovaly globulární částice komplexních

oxidů, které obsahovaly prvky s vysokovou afinitou ke kyslíku (titan, chrom, mangan a křemík). Z tohoto výsledku je patrné, že se při procesu svařování v okolí svarového kovu vyskytovalo větší množství kyslíku, což bylo pravděpodobně způsobeno nedokonalou ochranou svarového kovu inertním plynem během samotného svařování

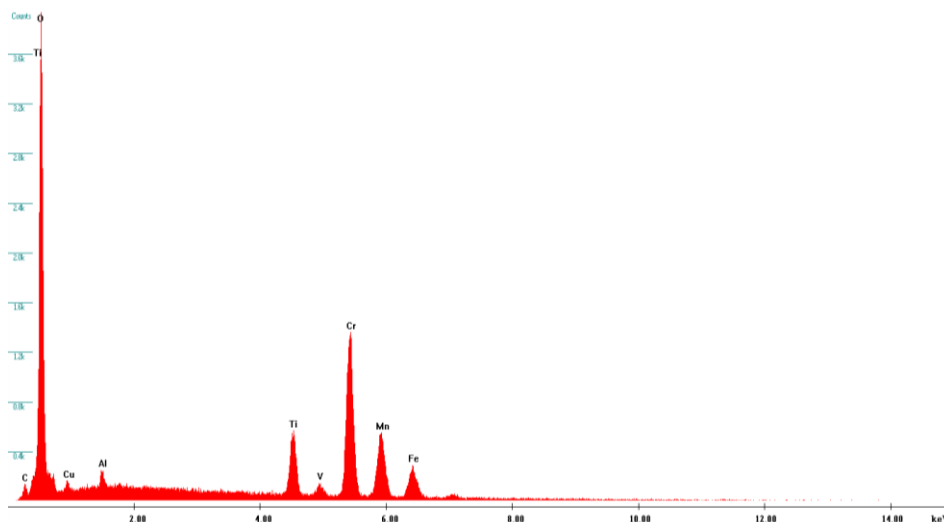
Licí struktura svarového kovu, byla tvořena austenitem a δ -feritem. Útvary δ -feritu byly obohaceny o chrom a molybden, tedy o silně feritotvorné prvky (zmenšují oblast železa γ). Přítomnost titanu v globulárních oxidech poté nasvědčuje tomu, že byl tento prvek obsažen v přídatném materiálu.



Obr. 6.4-10 Nekovová vrstva lemující studený spoj



Obr. 6.4-11 Oblasti měření rtg spektrální mikroanalýzou

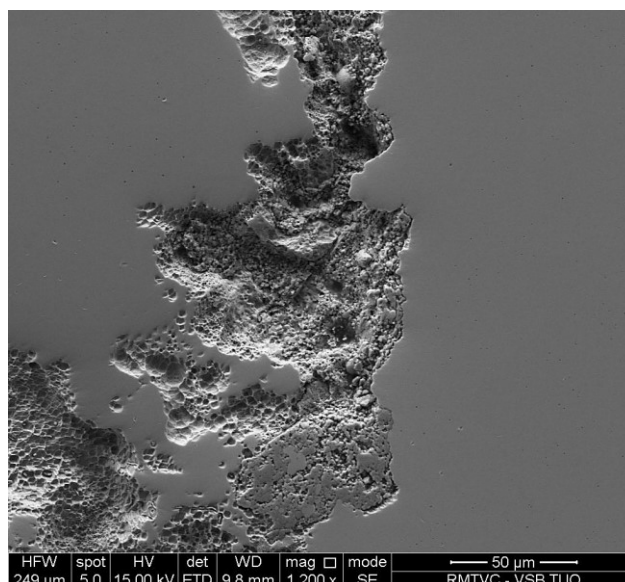


Obr. 6.4-12 Chemické složení – oblast č. 1

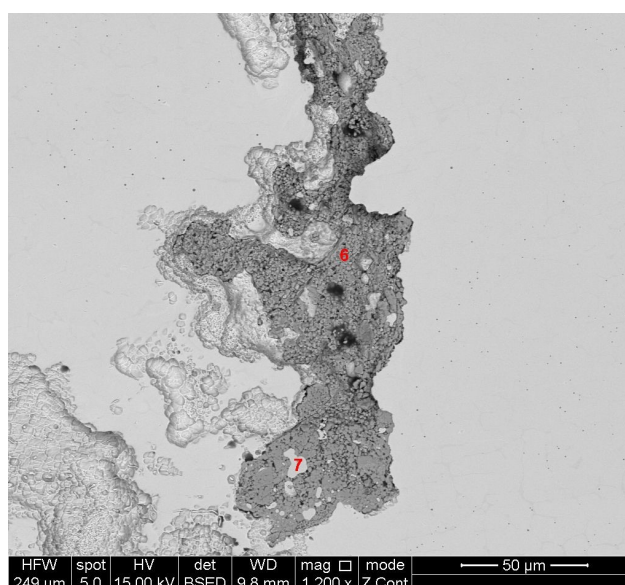
Tab. 6.4-1 Chemické složení měřených oblastí v [%]

Pozice	O	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu
1	33,6	0,8	0	8,1	33,9	12,6	9,4	0	1,6
2	32,9	0,5	0,5	3,2	39,1	17,4	4,6	0	1,8
3	7,7	0,5	0,7	6,1	16,7	3,9	53,4	9,5	0
4	0	0	0,6	0	20,8	0	67	9,1	0
5	0	0	0,7	0	26,5	0	63,2	5,8	0

Pomocí sekundárních elektronů je na (obr. 6.4-13) zobrazena topografie kořene studeného spoje. Na (obr. 6.4-14) jsou poté znázorněny oblasti, které byly podrobeny měření chemického složení rtg spektrální mikroanalýzou. Na snímku lze pozorovat místa tmavšího kontrastu odpovídající komplexním oxidům, ve kterých jsou zarostlé kovové částice. V (tab. 6.4-2) jsou uvedeny hodnoty obsahu jednotlivých chemických prvků v měřených oblastech. Měření potvrdilo, že stejně jako v předchozím defektu (nekovový lem podél studeného spoje) jsou v kořeni studeného spoje přítomné oxidy obohacené chromem, manganem a titanem. V oxidických i kovových částicích byla také opět prokázána přítomnost mědi, která byla pravděpodobně obsažena v přídavném materiálu.



Obr. 6.4-13 Topografie kořene studeného spoje



Obr. 6.4-14 Oblasti měřené rtg spektrální mikroanalýzou

Tab. 6.4-2 Chemické složení měřených oblastí v [%]

Pozice	O	Ti	Si	Mo	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu
6	31	2,9	2,8	0	40,4	19,2	4,5	0	2,1
7	0	0	0,8	0,8	21,1	1,1	69,6	3,5	3,1

6.4.2 Shrnutí

Studený spoj v kořeni svarového spoje vznikl při svařování, kdy došlo k přetečení svarového kovu. Povrch studeného spoje byl pokryt nerovnoměrnou vrstvou komplexních oxidů obohacených o prvky z přídavného materiálu, které jsou charakteristické vysokou afinitou ke kyslíku. Přetečení, s kterým souvisí i vznik studeného spoje, zcela zásadně vzniklo během procesu svařování. Za příčinu vzniku zmíněných vad je možné stanovit lidskou chybu svářeče, či nedodržení, respektive nesprávné navržení svařovacích parametrů.

7 Závěr

Cílem diplomové práce bylo zjištění příčin vzniku vad ve svarových spojkách z vysokolegované austenitické oceli X6CrNiTi 18-10, respektive bylo nutné určit, zda vady vznikly během procesu svařování, či během samotného provozu zařízení. Všechny vady, které byly přítomné ve zkoušených vzorcích, vznikly při procesu svařování a během provozu zařízení se již dále nerozšiřovaly. Téměř u všech vad, které byly zkoumány, se pomocí rtg spektrální mikroanalýzy zjistila přítomnost oxidů, které byly obohaceny o prvky s vysokou afinitou ke kyslíku. Z tohoto faktu je zřejmé, že svary nebyly patřičně chráněny před okolní atmosférou. Mohlo zde dojít k navržení, respektive k nastavení příliš nízkých, nebo naopak příliš vysokých hodnot průtoku inertního ochranného plynu. Při příliš vysokých hodnotách průtoku ochranného plynu vzniká turbulentní proudění, které může nasát okolní atmosféru do místa svařování. Další možností, která mohla zapříčinit vnik okolní atmosféry do místa svařování je příliš velká vzdálenost svařovacího hořáku od místa svařování. V tomto případě se jedná o hrubou chybu svářeče. Nedostatečná ochrana svarového spoje měla přímý vliv na vznik všech pórů, které se vyskytovaly ve zkoumaných vzorcích. Vznik těchto pórů souvisel se změnou rozpustnosti kyslíku v oceli během krystalizace a ochlazování svarového kovu.

Ve vzorcích se také objevily defekty, jejichž příčina byla stanovena nedodržením svařovacích podmínek a parametrů. Jednalo se především o přetečení, studené spoje a výrazné přesazení svařovaných částí. Z důvodu přítomnosti výrazného množství částic Ti_x , jenž brání růstu zrn, se studené spoje dále nešířily. Vzhledem k tomu, že austenitické oceli nejsou náchylné na vznik studených trhlin, se žádné trhliny ve vzorcích nevyskytovaly.

Jak jsem již zmínil v úvodu diplomové práce, tak zkoumání příčin vzniku defektů proběhlo pomocí topografického měření, metalografických zkoušek a zkoušek mikroskopického měření na elektronovém řádkovacím mikroskopu. Elektronová mikroskopie se pro tyto účely v oblasti svařování využívá velice zřídka a to kvůli vysokým nákladům. V rámci diplomové práce byly ovšem touto metodou zkoušení materiálu zajištěny nejpřesnější výsledky a proto byla tato metoda pro klasifikaci jednotlivých vad a zjištění příčin jejich vzniku metodou nejdůležitější.

V příloze jsou pro bližší informace uvedeny všechny výsledky měření chemického složení rtg spektrální mikroanalýzou. Pro větší přehlednost nebyly tyto výsledky umístěné v hlavní části diplomové práce.

Použitá literatura

- [1] KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, 240 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [2] NĚMEC, Josef, Svařování korozivzdorných a žárupevných ocelí. 2. přepracované vydání. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1975, 165 s.
- [3] ORSZÁGH, Viktor a Peter ORSZÁGH. *Zváranie TIG ocelí a neželezných kovov*. Bratislava: Polygrafia SAV, 1998. ISBN 80-88780-21-7.
- [4] Misiarz, Michal. *Vliv ochranného plynu na vlastnosti svarového spoje: Bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2015, 58s. Vedoucí práce: doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.
- [5] KOUKAL, Jaroslav a Tomáš ZMYDLENÝ. *Svařování I*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0870-6.
- [6] ČSN EN ISO 6520-1 *Svařování a příbuzné procesy- Klasifikace geometrických vad kovových materiálů- Část 1: Tavné svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2008
- [7] VODÁREK, Vlastimil. *Metody studia struktury*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2559-5.
- [8] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [9] WILLIAMS, David B. a C. Barry. CARTER. *Transmission electron microscopy: a textbook for materials science*. 2nd ed. New York: Springer, 2008. ISBN 978-0-387-76500-6.

Doplňková literatura

- [10] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [11] KUNCIPÁL, Josef. *Teorie svařování*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1986, 265 s.

- [12] KANDUS, Bohumil a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
- [13] FOLDYNA, Václav a Viktor ORSZÁGH. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 1999, 296 s. Svařování. ISBN 80-857-7163-2.
- [14] INVALID, David. *Výroba a vlastnosti vysokolegovaných chromových ocelí*. Brno 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 45 s. příloh. Vedoucí práce Ing. Antonín Záděra, Ph.D.
- [15] MINAŘÍK, Václav. *Přehled metod svařování*. 3., aktualiz. vyd. Ostrava: ZEROSS, c2011, 82 s. Svařování. ISBN 978-80-86698-18-2.
- [16] HRIVŇÁK, Ivan. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. Vyd. 1. Bratislava: Veda, 1989, 343 p. ISBN 8022400165.
- [17] KRUNCIPÁL, Josef. *Teorie svařování*. Praha: Alfa, 1986.
- [18] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [19] BOKŮVKOVÁ, Eliška. *Zkušební metody fyzikální metalurgie: elektronová mikroskopie I*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1984.
- [20] Kolektiv autorů *Materiály a jejich chování při svařování: Učební texty*. 1. vydání. ČSÚ s.r.o. Ostrava. 2016. 404 s.
- [21] HRIVŇÁK, I. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. 1. vydání. VSAV Bratislava. 1989. 344 s. ISBN 80-224- 0016-5
- [22] ČSN EN ISO 15614-1 *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupů svařování - Část. 1: Obloukové a plamenové svařování ocelé a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. Praha: Český normalizační institut, 2005

Seznam obrázků, grafů a tabulek

Obrázky, grafy

Obr. 2.1-1	Mikrostruktura vybraných korozivzdorných ocelí	11
Obr. 2.2.2-1	Mezikrystalové vylučování karbidů	14
Obr. 3.1.1-1	Strukturní oblasti při svařování nepolymorfních ocelí	17
Obr. 3.1.1-2	Schéma metody svařování 141 (TIG)	17
Obr. 3.1.2-1	Napětí a jeho vliv na šířku svarové housenky	18
Obr. 3.1.2-2	Svařovací proud a jeho vliv na šířku svarové housenky	19
Obr. 5-1	Produkty pružného a nepružného rozptýlu elektronů	24
Obr. 5.1-1	Řádkovací elektronový mikroskop QUANTA FEG 450	26
Obr. 5.1-2	Porovnání obrazu – zpětně odražené elektrony (a), sekundární elektrony (b) ...	27
Obr. 5.2.1-1	Mapa rozložení titanu v místě vady svarového spoje	28
Obr. 5.2.1-2	Lokální chemické složení materiálu vyjádřené pomocí píků.....	28
Obr. 6.1-1	Tomografické měření – pór	29
Obr. 6.1-2	Naznačení tomografického řezu (51°)	30
Obr. 6.1-3	Detail póru + výrazné přesazení	30
Obr. 6.1-4	Boční pohled - pór	30
Obr. 6.1-5	Naznačené řezy pro metalografickou zkoušku	31
Obr. 6.1-6	Pohled na vnitřní stranu potrubí – výrazné přesazení	31
Obr. 6.1-7	Makrostruktura plochy řezu	31
Obr. 6.1-8	Poloha vad	32
Obr. 6.1-9	Topografie vad	32
Obr. 6.1-10	Makrostruktura ovlivněného ZM	33
Obr. 6.1-11	Distribuce částic TiX v oblasti pod studeným spojem	33
Obr. 6.1-12	Nekovové částice okolo studeného spoje	34
Obr. 6.1-13	Oblasti měřené rtg spektrální mikroanalýzou	34
Obr. 6.1-14	Chemické složení – oblast č. 1	34
Obr. 6.1-15	Oblasti měřené rtg spektrální mikroanalýzou	35
Obr. 6.1-16	Rozměrová charakteristika vad	36
Obr. 6.2-1	Naznačení tomografického řezu (71)	37
Obr. 6.2-2	Rozměrová charakteristika póru	37
Obr. 6.2-3	Vnitřní povrch svarového spoje	38

Obr. 6.2-4	Defekty ve svarovém kovu	38
Obr. 6.2-5	Detail póru	38
Obr. 6.2-6	Detail pórů propojených oxidy	38
Obr. 6.2-7	Rozměrová charakteristika póru	39
Obr. 6.2-8	Topografie póru	39
Obr. 6.2-9	Oblasti měření rtg spektrální mikroanalýzou	40
Obr. 6.2-10	Chemické složení – oblast č. 1	40
Obr. 6.2-11	Plošné rozložení vybraných prvků v oblasti defektu (póru)	41
Obr. 6.2-12	Rozměrová charakteristika vady	42
Obr. 6.2-13	Oblasti měření rtg spektrální mikroanalýzou	42
Obr. 6.2-14	Chemické složení – oblast č. 11	43
Obr. 6.3-1	Tomografické měření – Vady v oblastech 1° a 356°	44
Obr. 6.3-2	Naznačení tomografického řezu (356°)	44
Obr. 6.3-3	Detail vady – rozměrová charakteristika	45
Obr. 6.3-4	Vnitřní povrch vzorku	45
Obr. 6.3-5	Studený spoj	45
Obr. 6.3-6	Detail studeného spoje	46
Obr. 6.3-7	Rozměrová charakteristika studeného spoje	46
Obr. 6.3-8	Mikrostruktura v oblasti studeného spoje	47
Obr. 6.3-9	Nekovová výplň v oblasti kořene studeného spoje	47
Obr. 6.3-10	Distribuce částic TiX v oblasti hranice ztavení	47
Obr. 6.3-11	Oblasti měření rtg spektrální mikroanalýzou	48
Obr. 6.3-12	Chemické složení – oblast č. 1	48
Obr. 6.3-13	Vyloučení δ -feritu v jednotlivých oblastech svaru	49
Obr. 6.3-14	Chemické složení – oblast č. 5	49
Obr. 6.3-15	Heterogenita výplně kořene studeného spoje	50
Obr. 6.4-1	Tomografické měření – výskyt vady	51
Obr. 6.4-2	Naznačení tomografických řezů (174°)	51
Obr. 6.4-3	Poloha vady	52
Obr. 6.4-4	Rozměrová charakteristika vady	52
Obr. 6.4-5	Vnitřní část vzorku – přetečení svarového kovu	52

Obr. 6.4-6	Přetečení a studený spoj v kořeni	53
Obr. 6.4-7	Mikrostruktura v oblasti studeného spoje	53
Obr. 6.4-8	Licí struktura svarového kovu	54
Obr. 6.4-9	Rozměrová charakteristika vady	54
Obr. 6.4-10	Nekovová vrstva lemující studený spoj	55
Obr. 6.4-11	Oblasti měření rtg spektrální mikroanalýzou	56
Obr. 6.4-12	Chemické složení – oblast č. 1	56
Obr. 6.4-13	Topografie kořene studeného spoje	57
Obr. 6.4-14	Oblasti měření rtg spektrální mikroanalýzou	57

Tabulky

Tab. 3.1.2-1	Doporučené svař. parametry s ohledem na tloušťku základního materiálu.....	19
Tab. 4.1-1	Vady ve svarových spojkách dle normy ČSN EN ISO 6520 – 1	22
Tab. 6.1-1	Chemické složení měřených oblastí v [%]	35
Tab. 6.1-2	Chemické složení SK v okolí póru v [%]	35
Tab. 6.1-3	Chemické složení kořenové housenky v [%]	36
Tab. 6.2-1	Chemické složení měřených oblastí v [%]	40
Tab. 6.2-1	Chemické složení měřených oblastí v [%]	43
Tab. 6.3-1	Chemické složení měřených oblastí v [%]	48
Tab. 6.3-2	Chemické složení měřených oblastí v [%]	49
Tab. 6.3-3	Chemické složení měřených oblastí v [%]	50
Tab. 6.4-1	Chemické složení měřených oblastí v [%]	56
Tab. 6.4-2	Chemické složení měřených oblastí v [%]	57

8 Přílohy

Seznam příloh

Příloha A – Rtg spektrální mikroanalýza vybraných oblastí vzorku č. 1

Příloha B – Rtg spektrální mikroanalýza vybraných oblastí vzorku č. 2

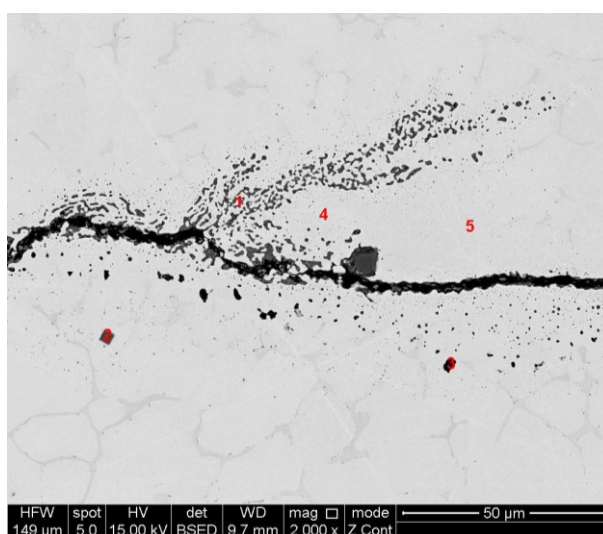
Příloha C – Rtg spektrální mikroanalýza vybraných oblastí vzorku č. 3

Příloha D – Rtg spektrální mikroanalýza vybraných oblastí vzorku č. 4

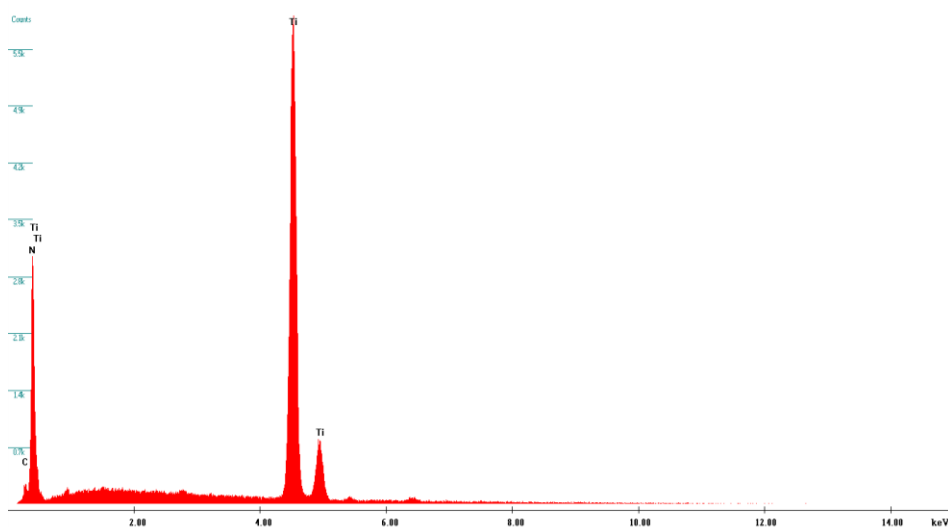
Zvláštní příloha

Elektronická verze diplomové práce na CD

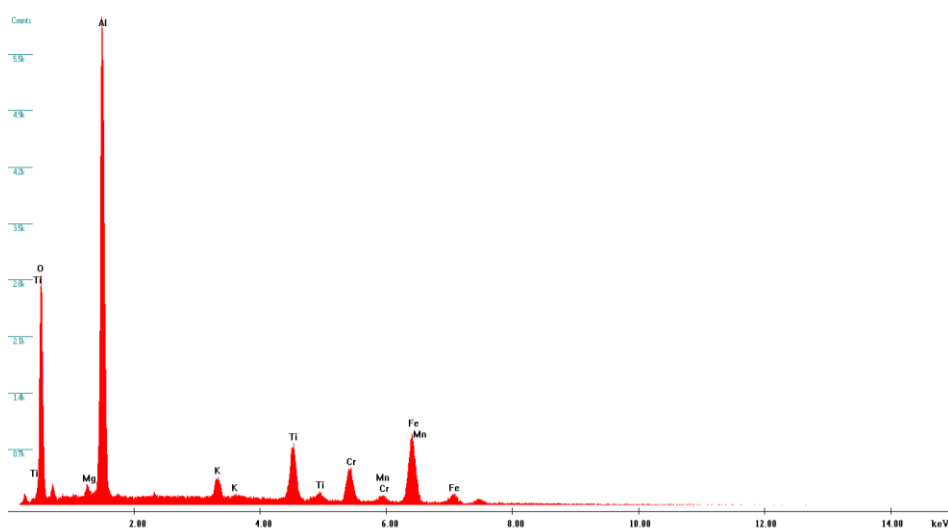
8.1 Příloha A – Rtg spektrální mikroanalýza vybraných oblastí vzorku č. 1



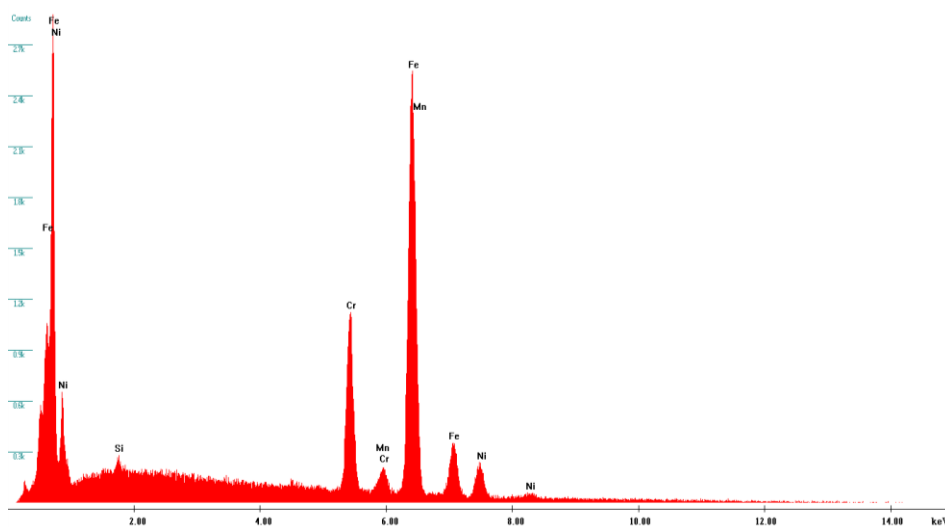
Obr. 8.1-1 Oblasti měřené rtg spektrální mikroanalýzou



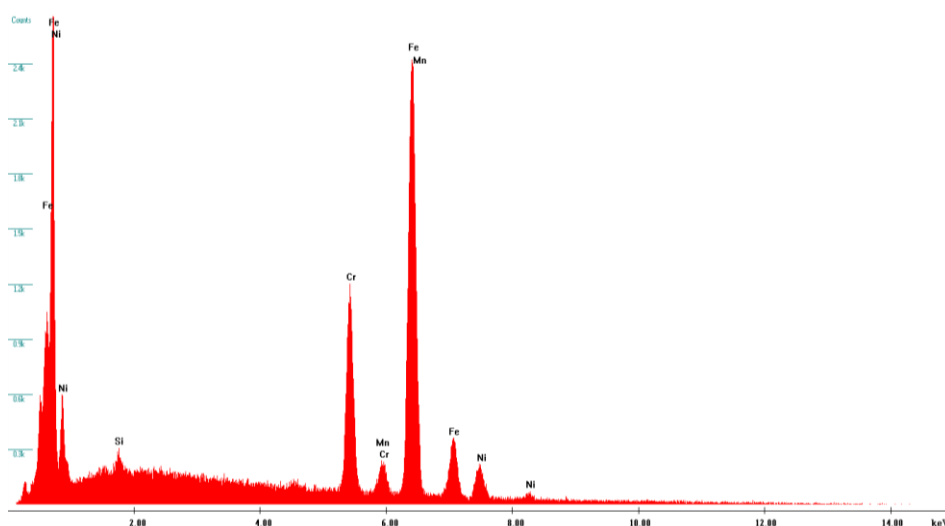
Obr. 8.1-2 Chemické složení – oblast č. 2



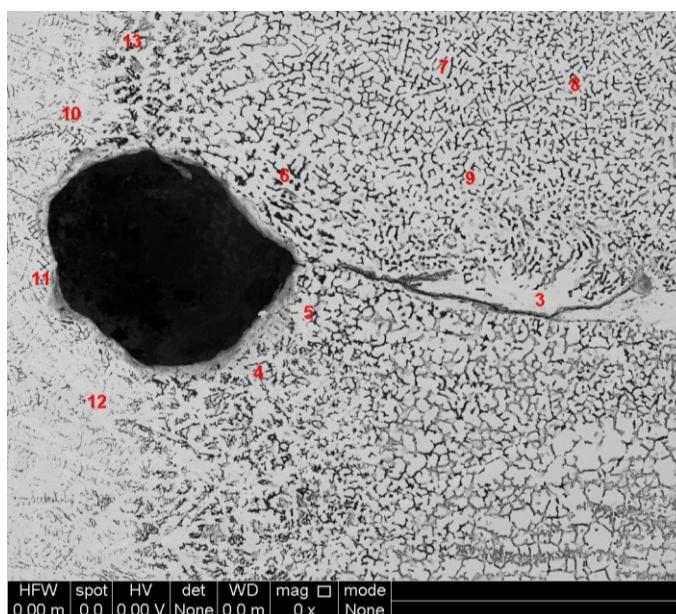
Obr. 8.1-3 Chemické složení – oblast č. 3



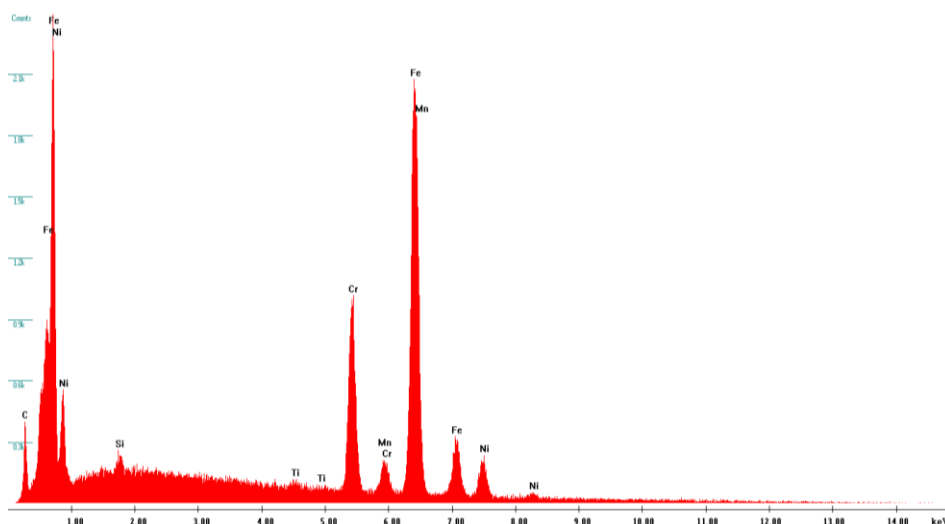
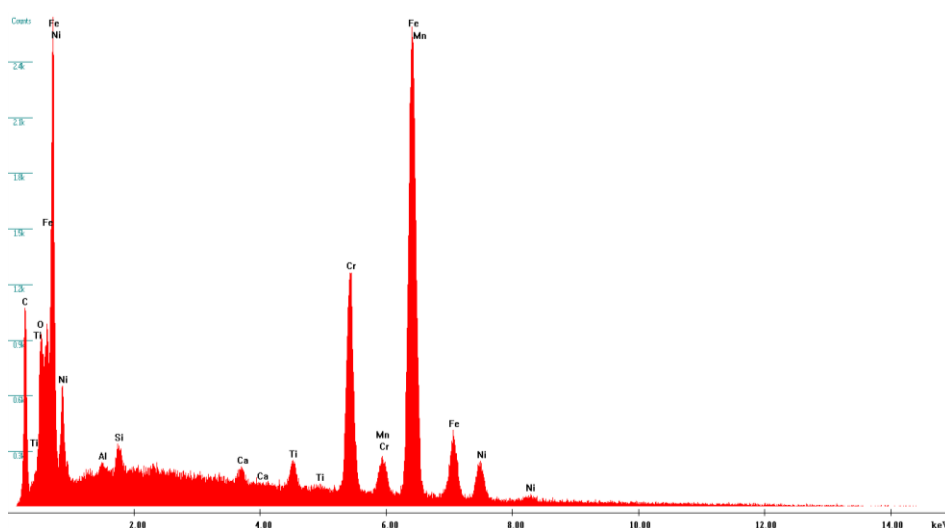
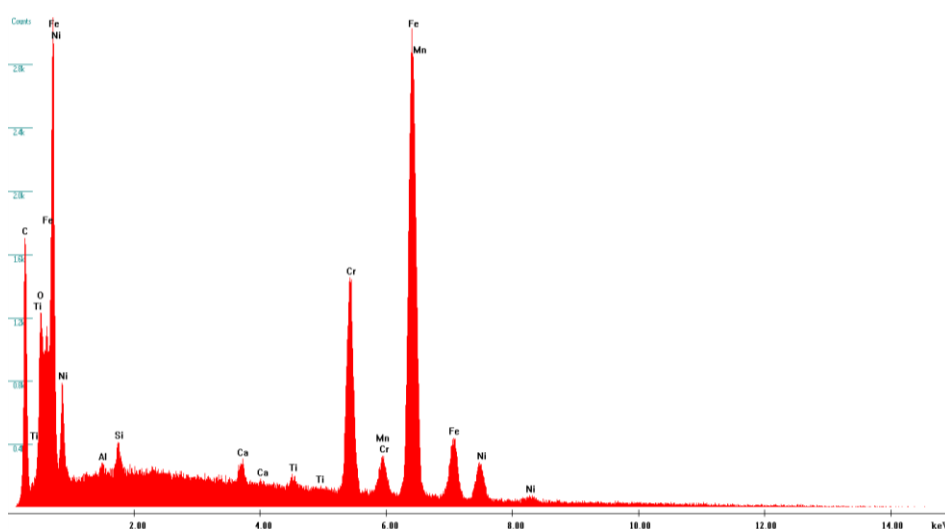
Obr. 8.1-4 Chemické složení – oblast č. 4

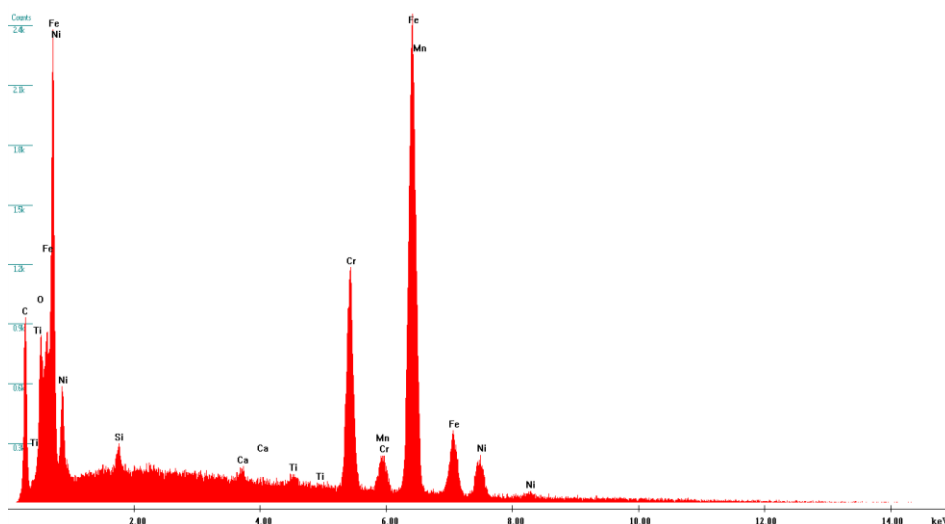
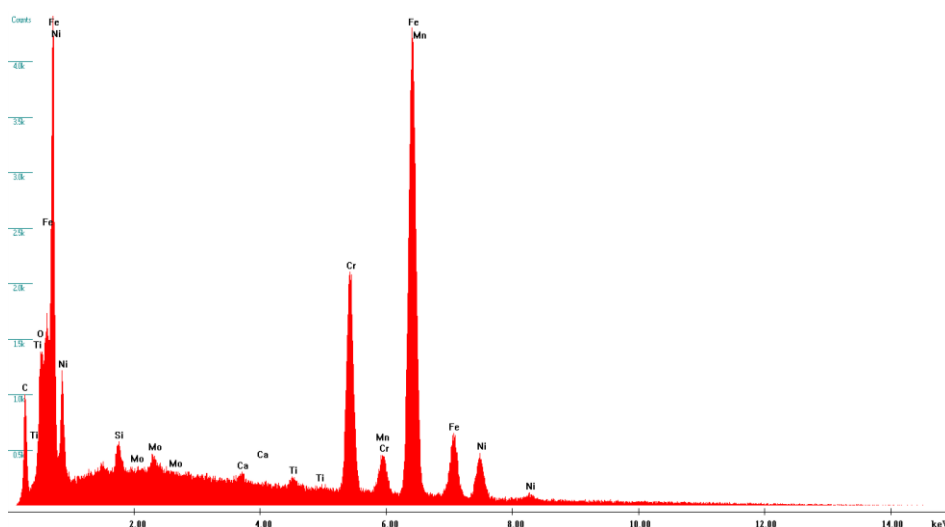
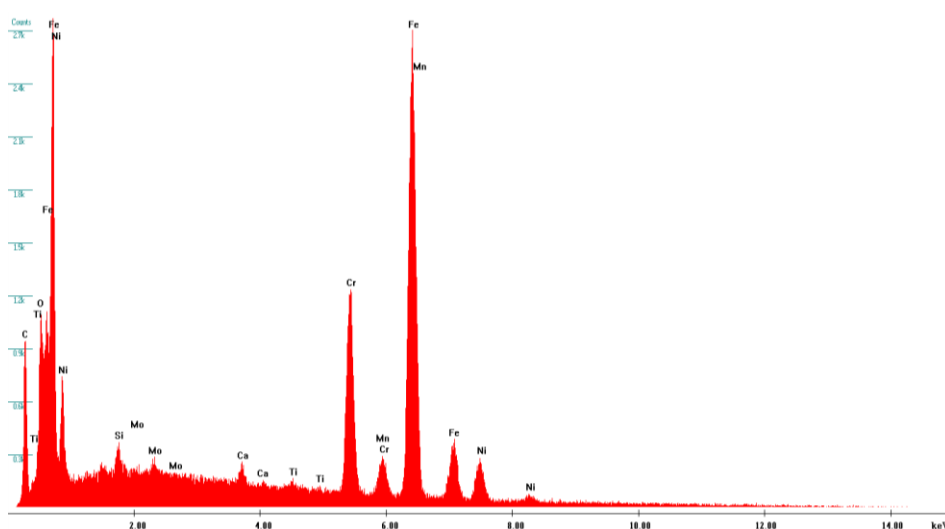


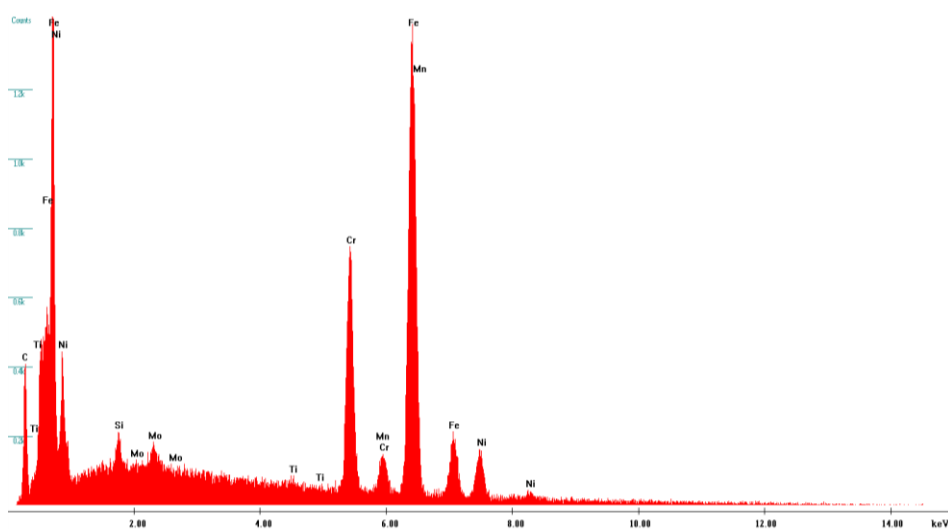
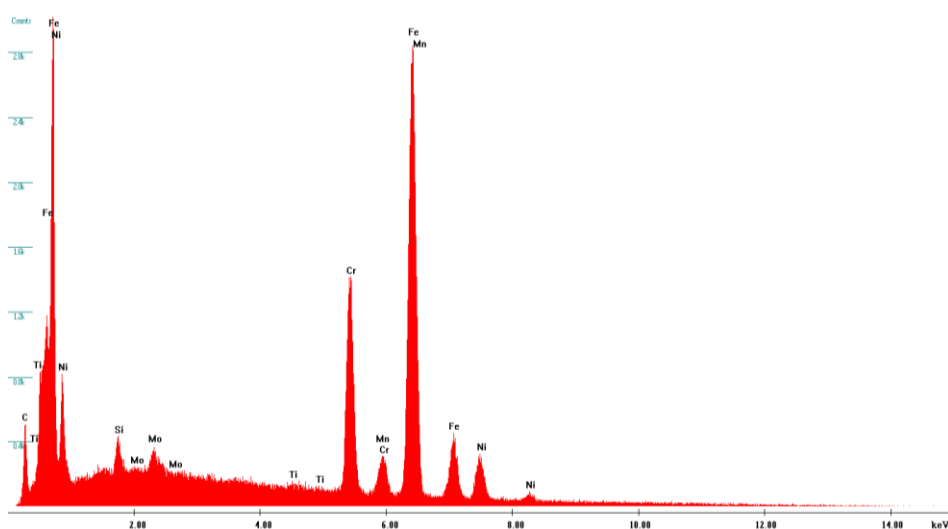
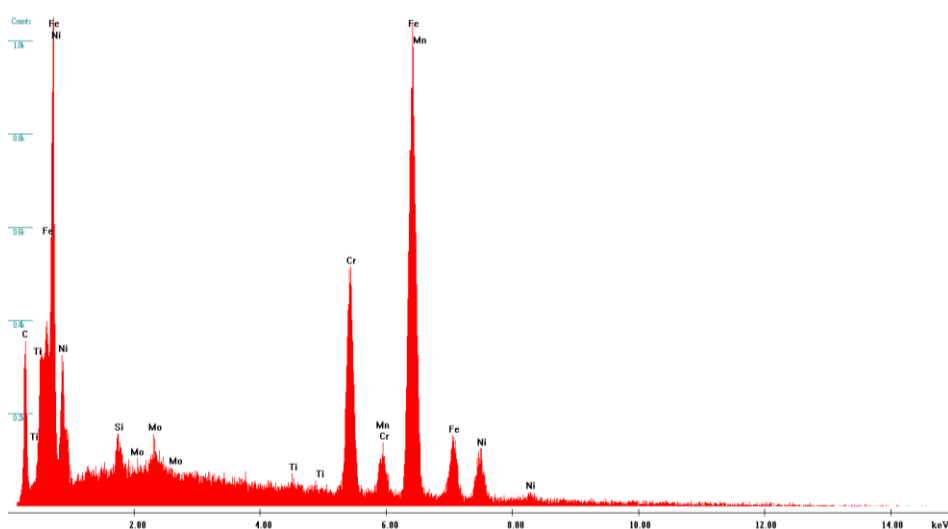
Obr. 8.1-5 Chemické složení – oblast č. 5



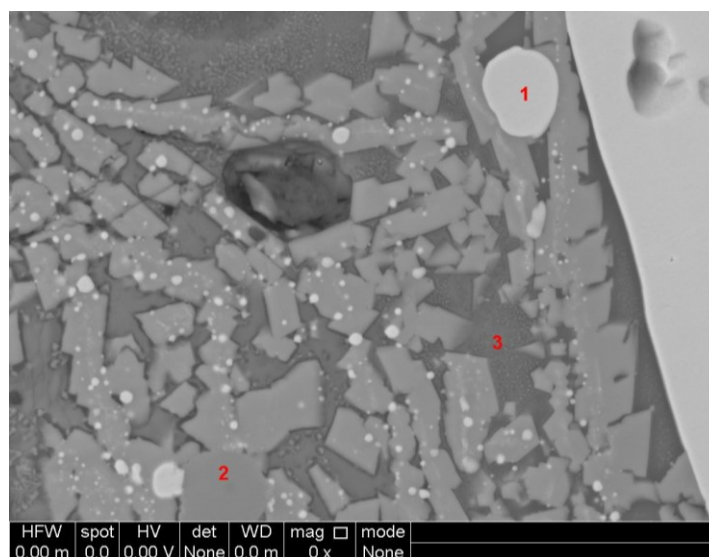
Obr. 8.1-6 Oblasti měřené rtg spektrální mikroanalýzou

*Obr. 8.1-7 Chemické složení – oblast č. 3**Obr. 8.1-8 Chemické složení – oblast č. 4**Obr. 8.1-9 Chemické složení – oblast č. 5*

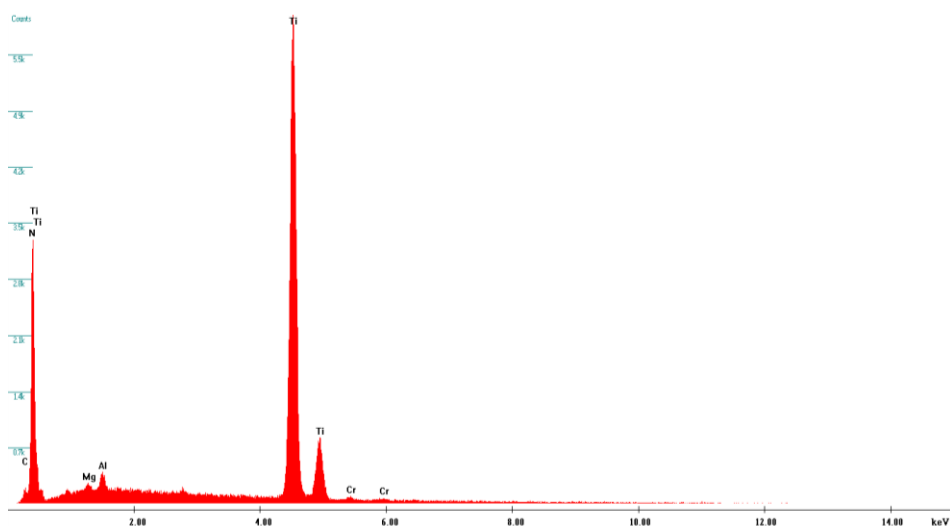
*Obr. 8.1-10 Chemické složení – oblast č. 6**Obr. 8.1-11 Chemické složení – oblast č. 8**Obr. 8.1-12 Chemické složení – oblast č. 9*

*Obr. 8.1-13 Chemické složení – oblast č. 10**Obr. 8.1-14 Chemické složení – oblast č. 11**Obr. 8.1-15 Chemické složení – oblast č. 12*

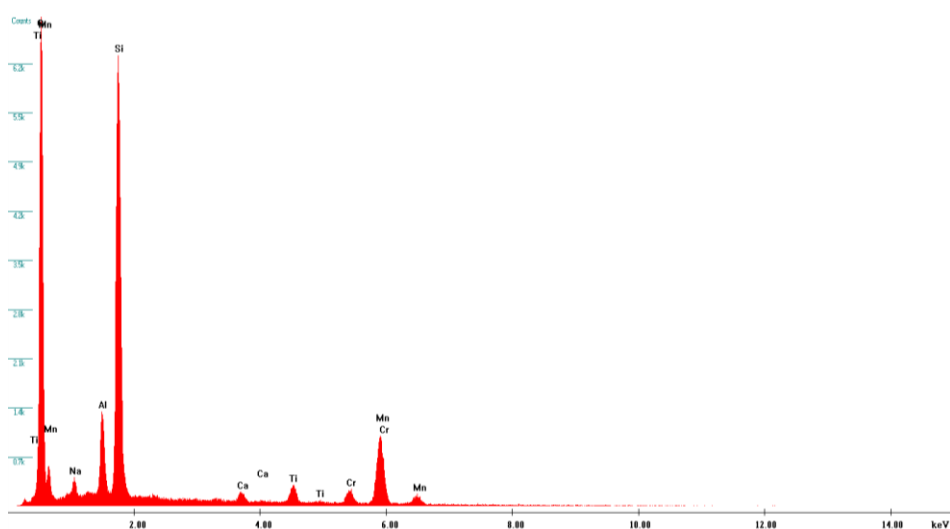
8.2 Příloha B – Rtg spektrální mikroanalýza vybraných oblastí vzorku č. 2



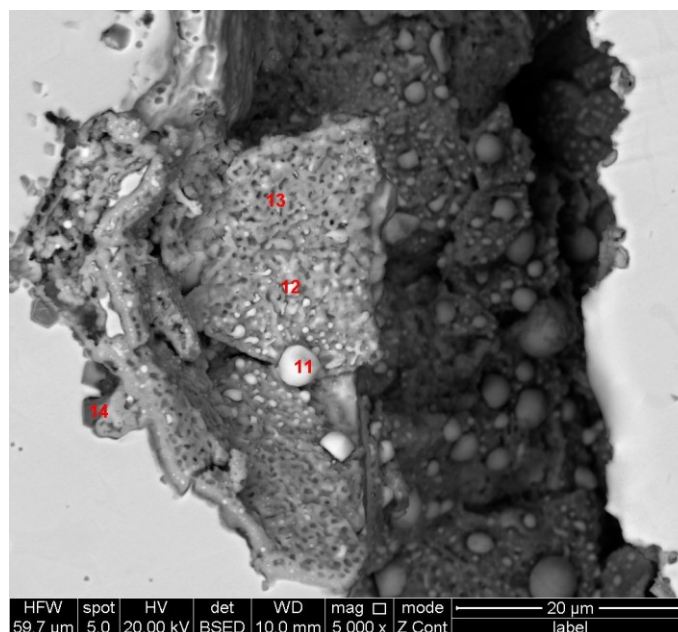
Obr. 8.2-1 Oblasti měřené rtg spektrální mikroanalýzou



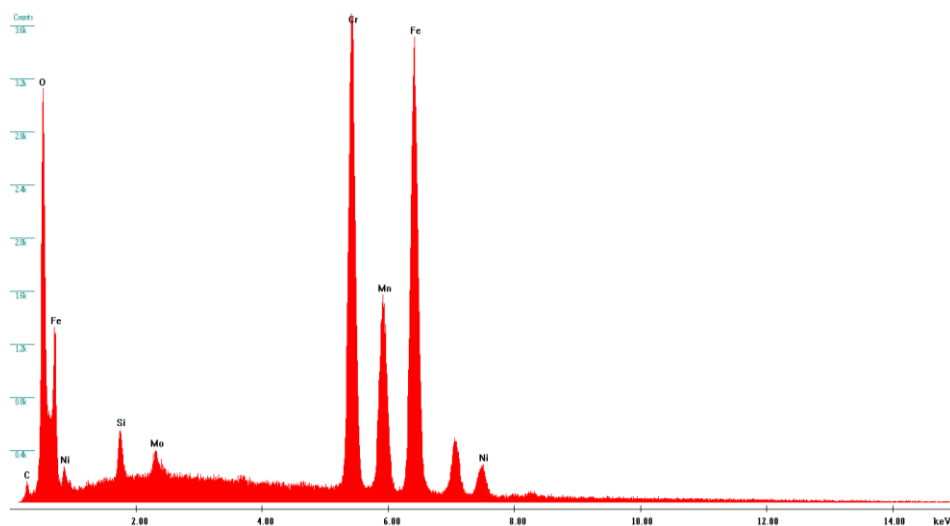
Obr. 8.2-2 Chemické složení – oblast č. 2



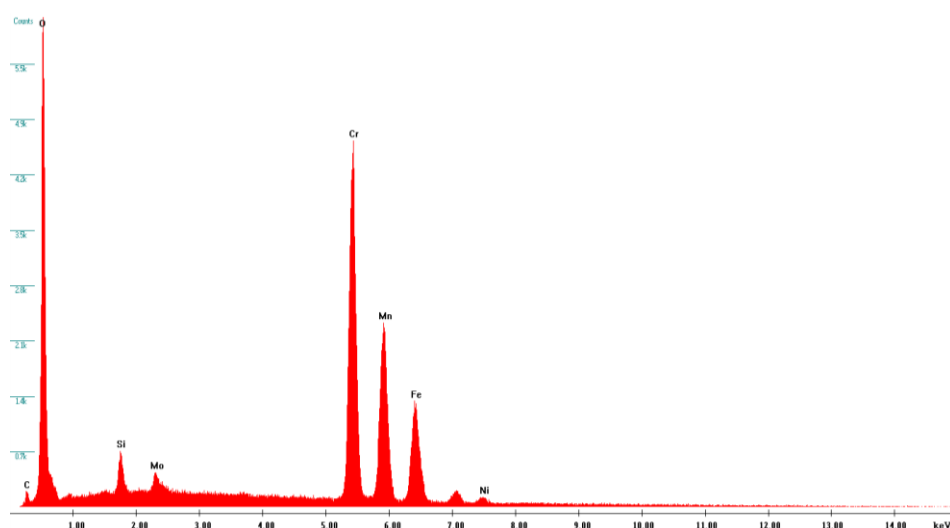
Obr. 8.2-3 Chemické složení – oblast č. 3



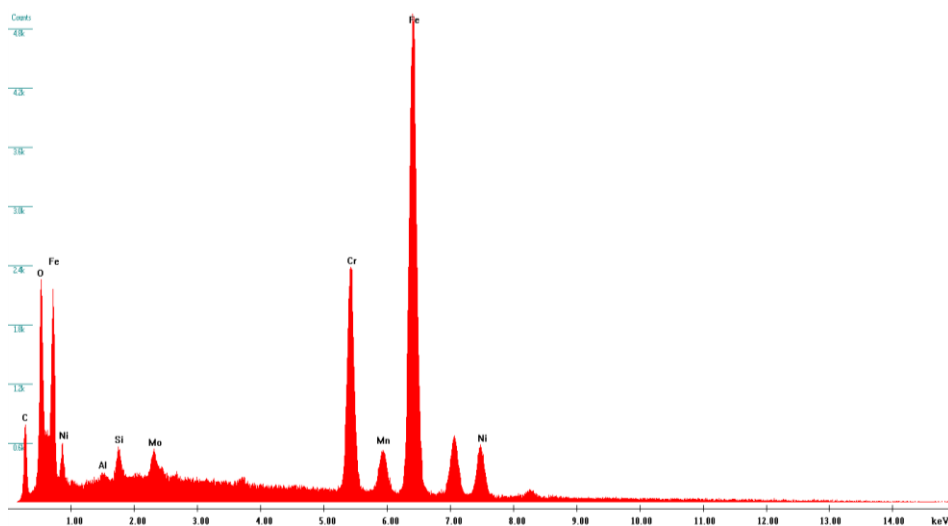
Obr. 8.2-4 Oblasti měřené rtg spektrální mikroanalýzou



Obr. 8.2-5 Chemické složení – oblast č. 12

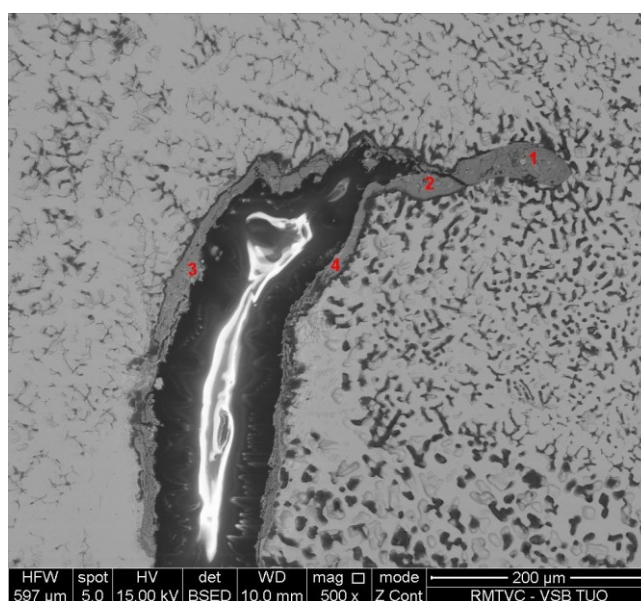


Obr. 8.2-6 Chemické složení – oblast č. 13

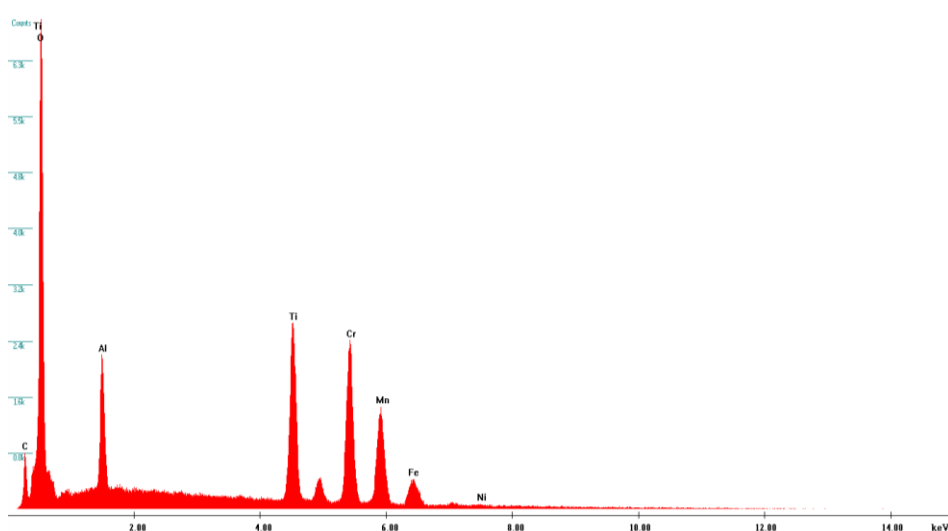


Obr. 8.2-7 Chemické složení – oblast č. 14

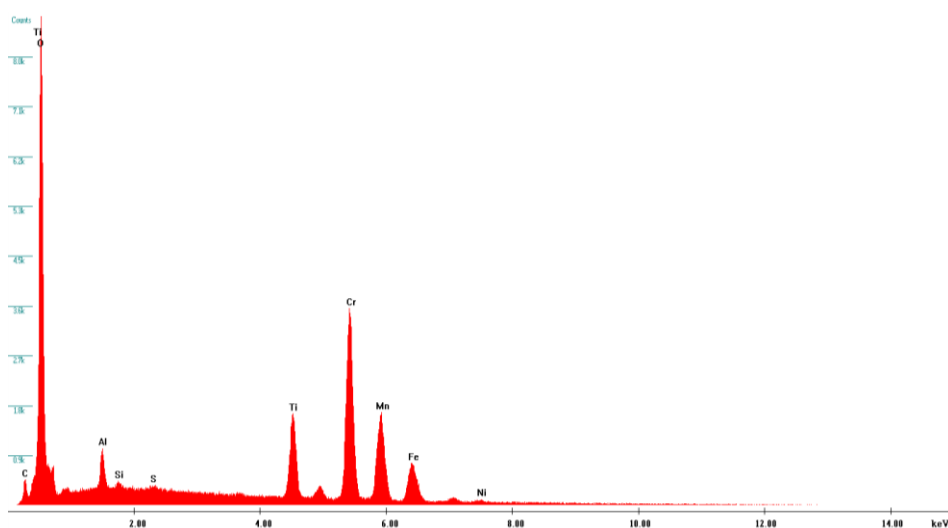
8.3 Příloha C – Rtg spektrální mikroanalýza vybraných oblastí vzorku č. 3



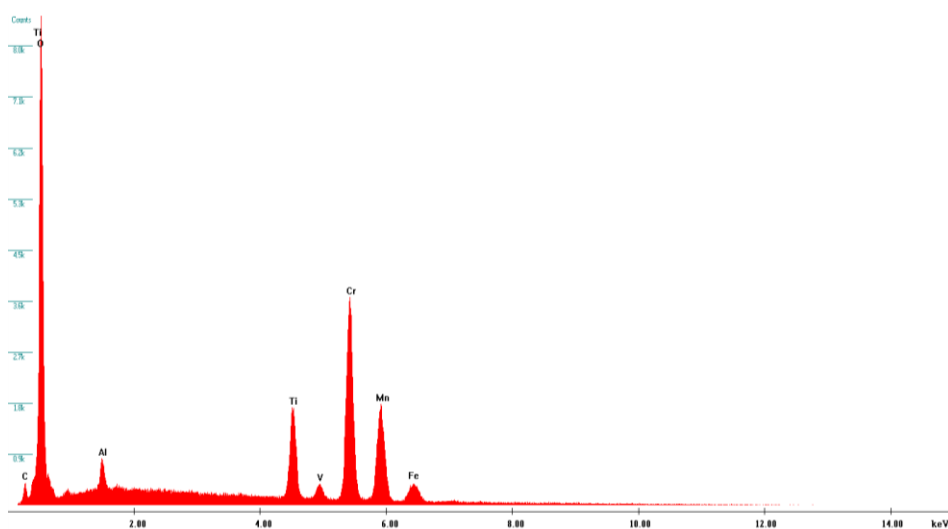
Obr. 8.3-1 Oblasti měřené rtg spektrální mikroanalýzou



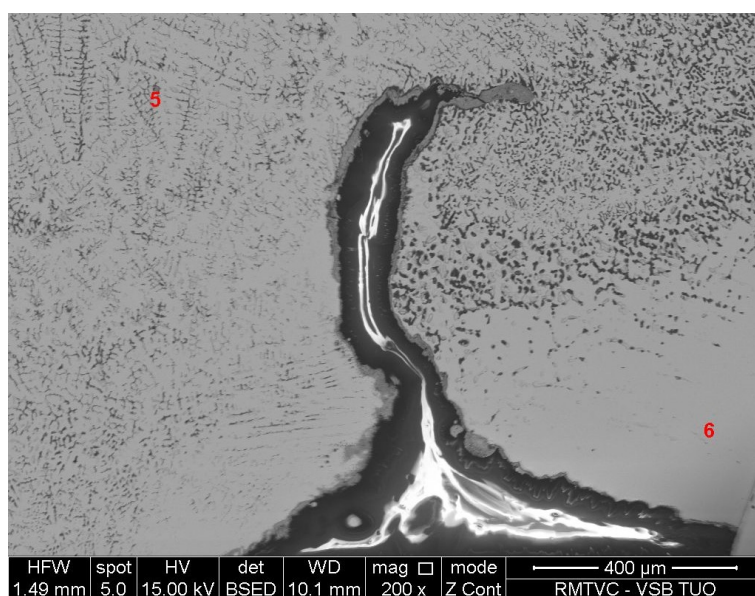
Obr. 8.3-2 Chemické složení – oblast č. 2



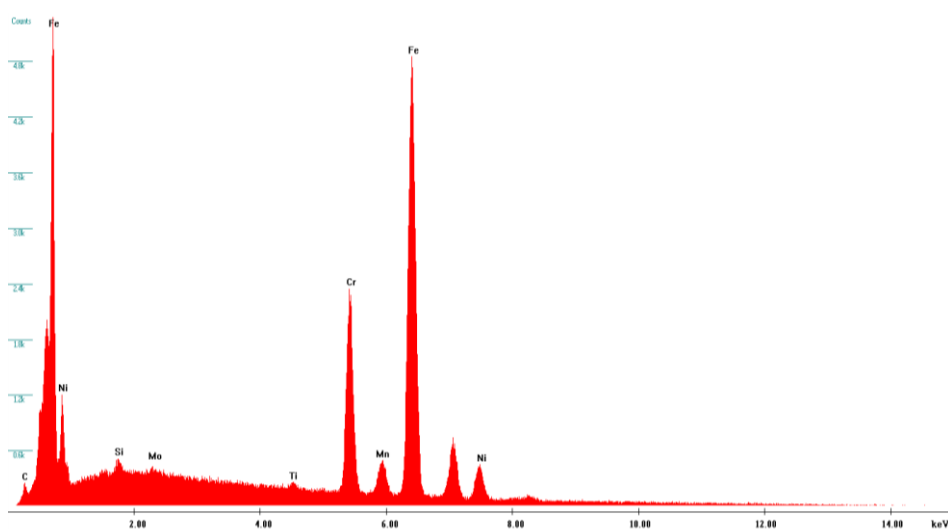
Obr. 8.3-3 Chemické složení – oblast č. 3



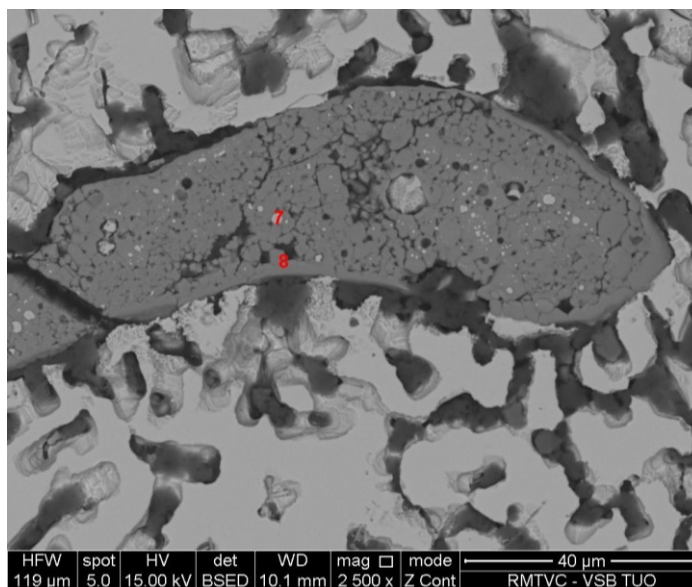
Obr. 8.3-4 Chemické složení – oblast č. 4



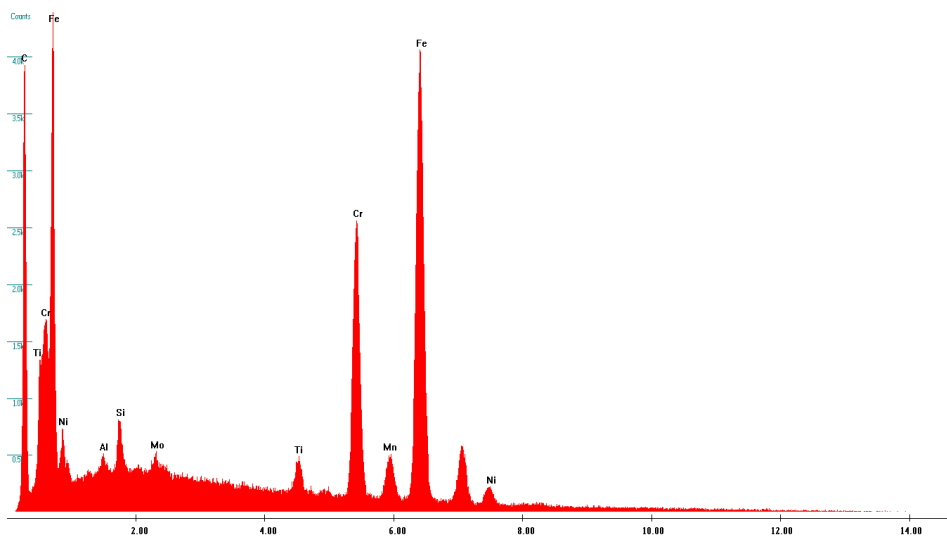
Obr. 8.3-5 Oblasti měřené rtg spektrální mikroanalýzou



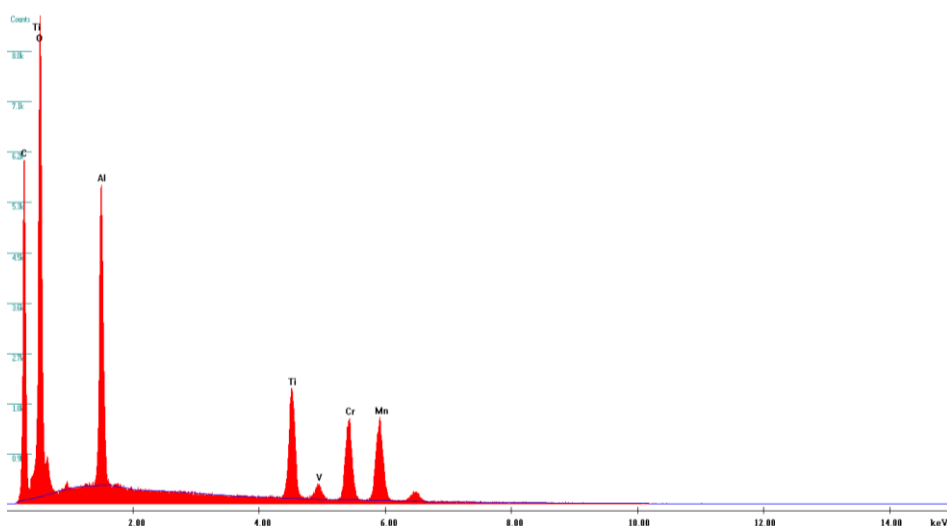
Obr. 8.3-6 Chemické složení – oblast č. 6



Obr. 8.3-7 Oblasti měřené rtg spektrální mikroanalýzou

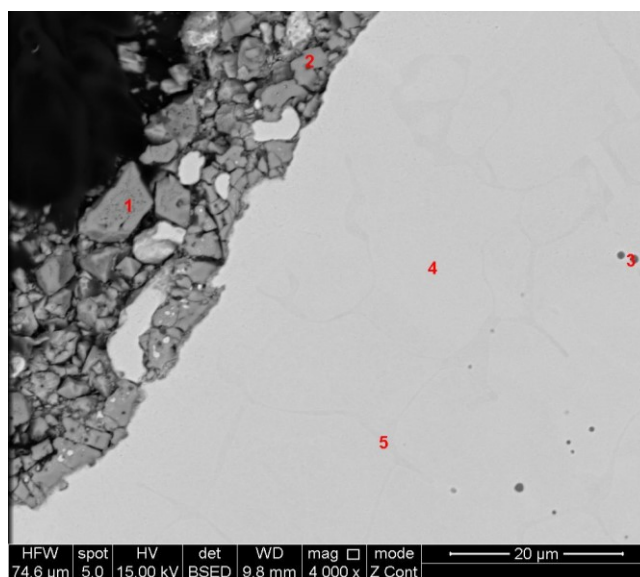


Obr. 8.3-8 Chemické složení – oblast č. 7

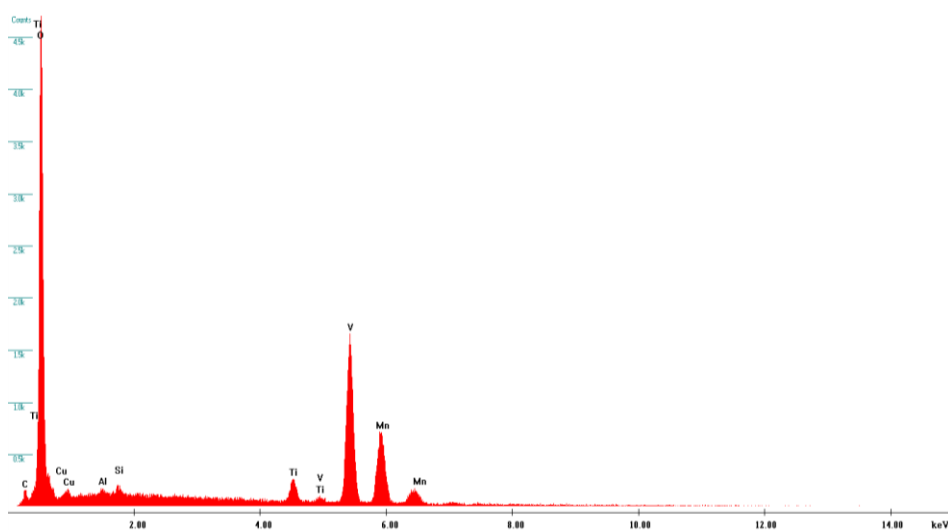


Obr. 8.3-9 Chemické složení – oblast č. 8

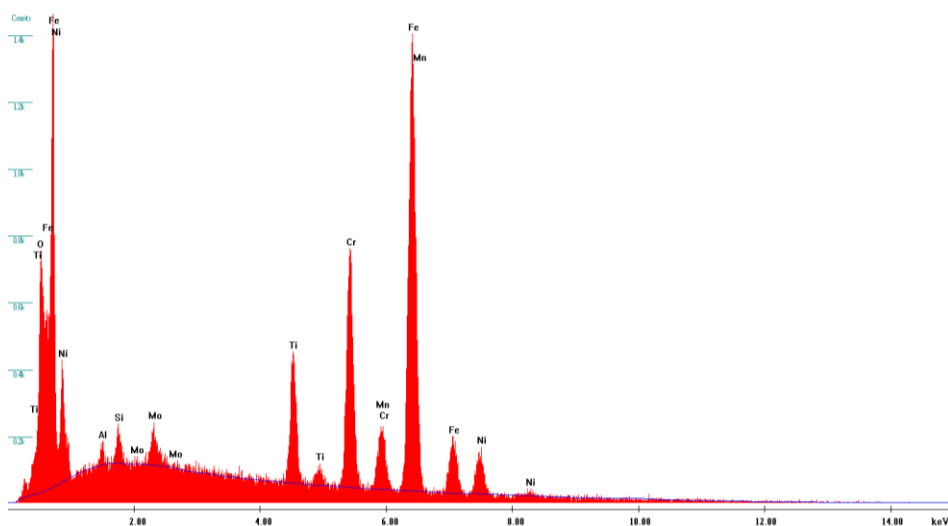
8.4 Příloha D – Rtg spektrální mikroanalýza vybraných oblastí vzorku č. 4



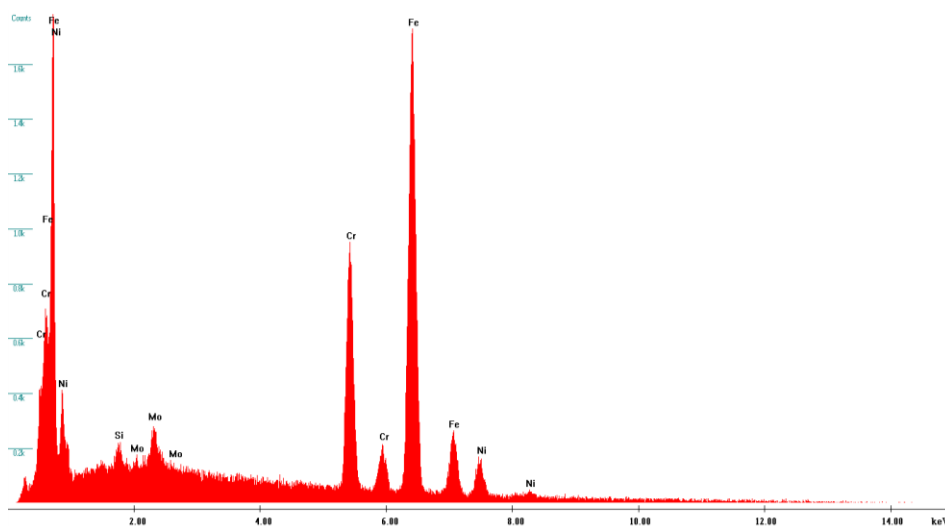
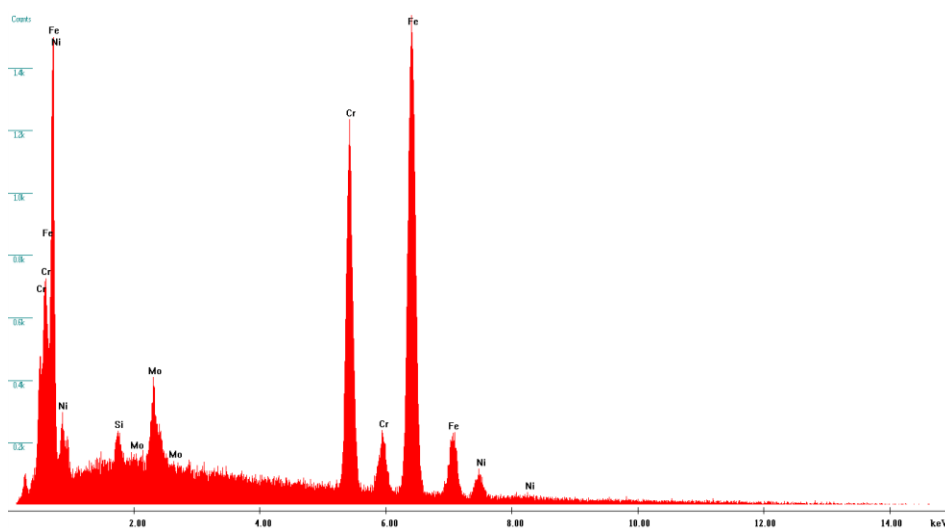
Obr. 8.4-1 Oblasti měřené rtg spektrální mikroanalýzou

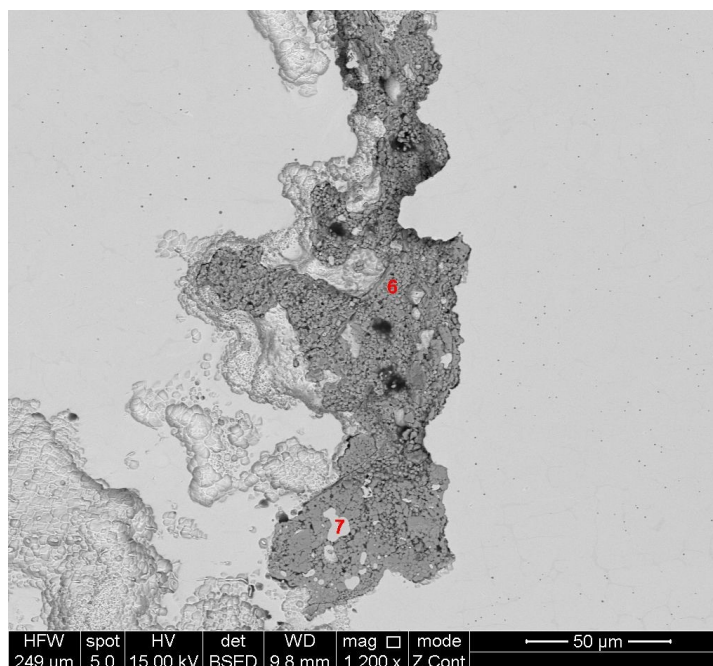


Obr. 8.4-2 Chemické složení – oblast č. 2

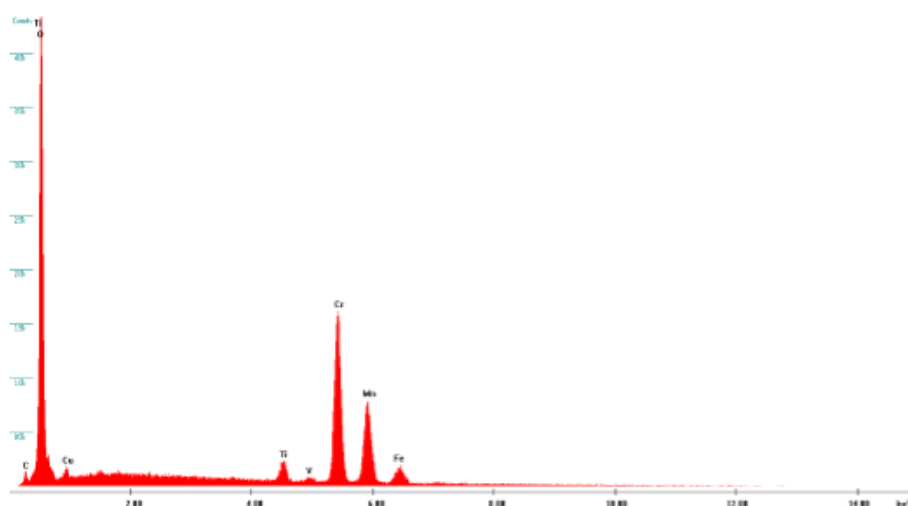


Obr. 8.4-3 Chemické složení – oblast č. 3

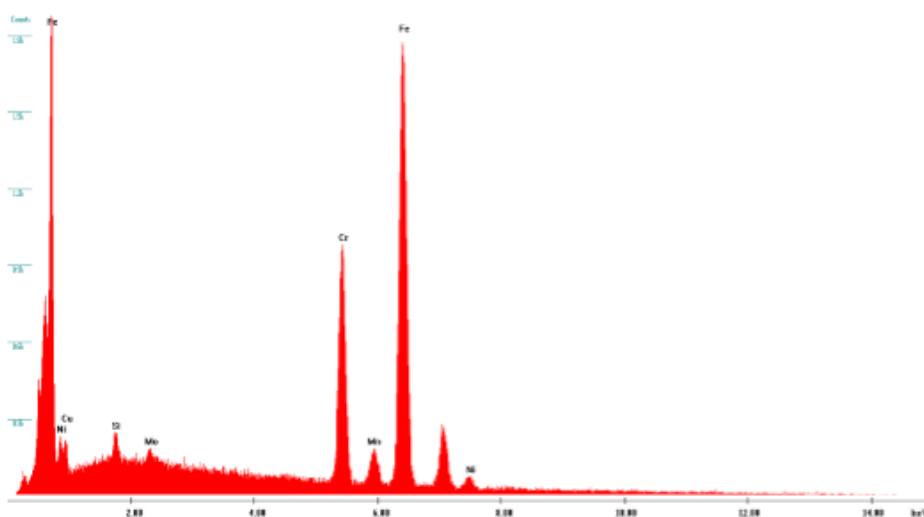
*Obr. 8.4-4 Chemické složení – oblast č. 4**Obr. 8.4-5 Chemické složení – oblast č. 5*



Obr. 8.4-6 Oblasti měřené rtg spektrální mikroanalýzou



Obr. 8.4-7 Chemické složení – oblast č. 6



Obr. 8.4-8 Chemické složení – oblast č. 7